

# DESENVOLVIMENTO DE UM PRODUTO DE VAPOR DE ÁGUA INTEGRADO COM BASE EM ESTIMATIVAS GNSS

## *Development of an integrated water vapor product based on GNSS estimates*

Gonçalo Rodrigues<sup>(1)</sup>, Tiago Machado<sup>(1,3)</sup>, João Paulo A. Martins<sup>(1,2)</sup>, Pedro Viterbo<sup>(1,2)</sup>, Rui Fernandes<sup>(4)</sup>, Machiel Bos<sup>(4)</sup>, Hugo Valentim<sup>(4)</sup>

(1) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Lisboa

(2) Universidade de Aveiro, Aveiro

(3) Universidade de Lisboa, Instituto Dom Luiz (IDL), Lisboa

(4) Universidade da Beira Interior (UBI), Covilhã

### SUMMARY

*The water vapor affects the signal reception of the Global Navigation System Satellite System (GNSS) and, as such, the GNSS observations can be used to estimate the amount of water vapor in the atmosphere. This observation technique has a good time resolution (a few minutes), and the significant increase in the number of GNSS stations in recent years in Portugal allows good spatial coverage of the territory. As this technology relies on microwave frequencies, estimates are possible under any weather situation. Nevertheless, these data are not yet used to the weather forecast in Portugal, and in that way the NUVEM project aims to develop and implement methods to calculate the delay Zenith Tropospheric (ZTD) and the corresponding precipitable water vapor (PWV) in near real time, and the integrate them in the weather forecast made by IPMA. These new products will be particularly useful for nowcasting of extreme precipitation events in Portugal.*

### Introdução

Medir a quantidade do vapor de água é um processo difícil mas de grande importância não só para a previsão do tempo como para estudos climáticos.

A quantidade de vapor de água pode mudar rapidamente e está muitas vezes associada a condições meteorológicas extremas como cheias repentinas, difíceis de prever pelos atuais sistemas meteorológicos, podendo causar grandes danos económicos e humanitários.

Atualmente existem alguns meios para estimar a distribuição vertical e horizontal do vapor de água, entre eles as radiossondas e os perfiladores a bordo de satélites de órbita polar.

As radiossondas ou balões meteorológicos dispõem de sensores para medir as principais variáveis meteorológicas entre elas a pressão atmosférica, temperatura e humidade relativa do ar e vento ao longo da atmosfera na vertical, enviados para o solo via sinal de rádio. Apesar destas medições fornecerem uma boa resolução vertical, apresentam várias desvantagens, entre elas o custo operacional elevado, restringindo o número de lançamentos e locais onde são lançados os balões meteorológicos. Em Portugal Continental só um balão é lançado às 12 UTC de cada dia na estação de Gago-Coutinho em Lisboa. Devido a estas restrições, as medições da radiossonda não resolvem a variabilidade temporal e espacial do vapor de água, que ocorre em escalas muito mais finas do que a variabilidade de temperatura e humidade relativa do ar [Ortiz de Galisteo et al., 2011]. Os perfiladores a bordo dos satélites de órbita polar como o Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) e o Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS), permitem obter campos de vapor de água com uma resolução de poucas dezenas de

quilómetros, num total de 4 vezes por dia. Estes instrumentos, por obterem a maior parte da informação na região do infravermelho, são condicionados pela presença de nuvens, não sendo ideais para analisar os campos de vapor de água nas situações de nebulosidade/precipitação. O radar meteorológico tem sido uma ferramenta essencial para a previsão de *nowcasting*, conta com alta resolução temporal mas apenas permite detetar de forma fiável sistemas convectivos quando já existe água líquida na atmosfera. As medições através de recetores de sinal do Sistema Global de Navegação por satélite (GNSS) surgem neste momento como uma das técnicas mais poderosas para o estudo do vapor de água [Hagemann et al., 2003; Heise et al., 2009].

O processamento atmosférico GNSS permite uma observação quase contínua e uma resolução espacial elevada em áreas com boa cobertura de estações. Apresentam ainda capacidade de observação do vapor de água na atmosfera em todas as condições, nomeadamente em condições de precipitação convectiva, eventos que os modelos numéricos têm grandes dificuldades em prever, sobretudo na quantidade de precipitação, a sua variação espacial e a hora exata destes fenómenos.

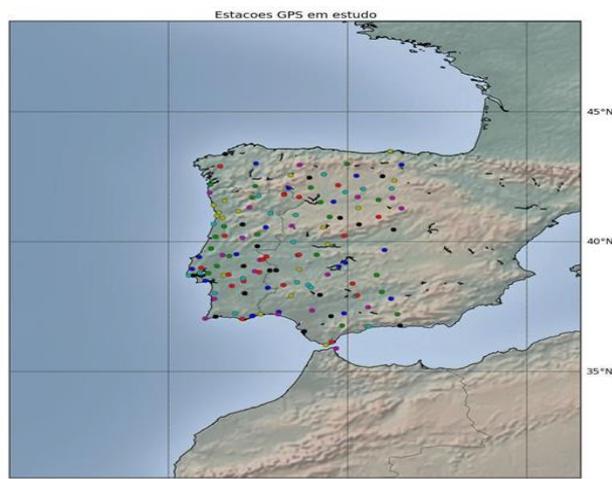
No âmbito do projeto da FCT NUVEM (Novos métodos para usar estimativas GNSS-PWV na Meteorologia de Portugal), que resulta da parceria entre o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) com o grupo de Geodesia Espacial (Space & Earth Geodetic Analysis Laboratory, SEGAL) da Universidade da Beira Interior (UBI), já se calculam valores de atraso zenital troposférico (ZTD), procedendo-se de seguida à sua conversão em quantidade de vapor de água integrado. O

objetivo do projeto é a implementação e validação de um produto de PWV a partir de medições obtidas em terra a partir do sistema de navegação global por satélite (GNSS) no centro de previsão operacional do IPMA.

O atraso do sinal na troposfera é determinado pela refratividade ao longo do percurso do sinal, que por sua vez é maioritariamente causada pelo vapor de água existente na atmosfera. Estimando o atraso que afeta a propagação do sinal entre as estações GNSS e os satélites é possível estimar a coluna de vapor de água na troposfera acima de cada estação. Esta técnica de observação para a previsão nowcasting melhorou consideravelmente nos últimos anos, devido a:

a) Aumento da frequência na transmissão dos dados em bruto de GNSS (enviados de hora a hora e/ou em tempo real);

b) Melhoria da cobertura, com o aumento significativo do número de estações das redes GNSS nos últimos 5 anos, incluindo Portugal e Espanha (Figura 1).



**Figura 1 – Cobertura de estações GNSS em Portugal e parte do território espanhol**

## Metodologia

As três principais atividades desenvolvidas no projeto NUVEM passam por:

- Desenvolvimento de métodos que permitam calcular o Atraso Zenital Troposférico e o correspondente vapor de água precipitável (PWV) em tempo quase real.

- Auxílio ao nowcasting em Portugal utilizando as estimativas de ZTD/PWV.
- Automatização de todo o processo, desde a recolha de dados de pressão e temperatura até à utilização dos dados de vapor de água para nowcasting no IPMA.

Em Portugal, existem duas redes de recetores GNSS de terra: a rede RENEPE, mantida pela Direção-Geral do Território e a rede SERVIR, implementada em 2006 pelo Instituto Geográfico do Exército. Ambas fornecem em quase tempo real, ficheiros RINEX (Receiver Independent Exchange Format) para um pós-processamento dos dados de satélite e para um total de 59 estações em Portugal continental. A equipa do SEGAL que trabalha nesta nova tecnologia em Portugal em parceria com o IPMA, extrai estimativas ZTD para a última hora em cada estação das redes RENEPE e SERVIR.

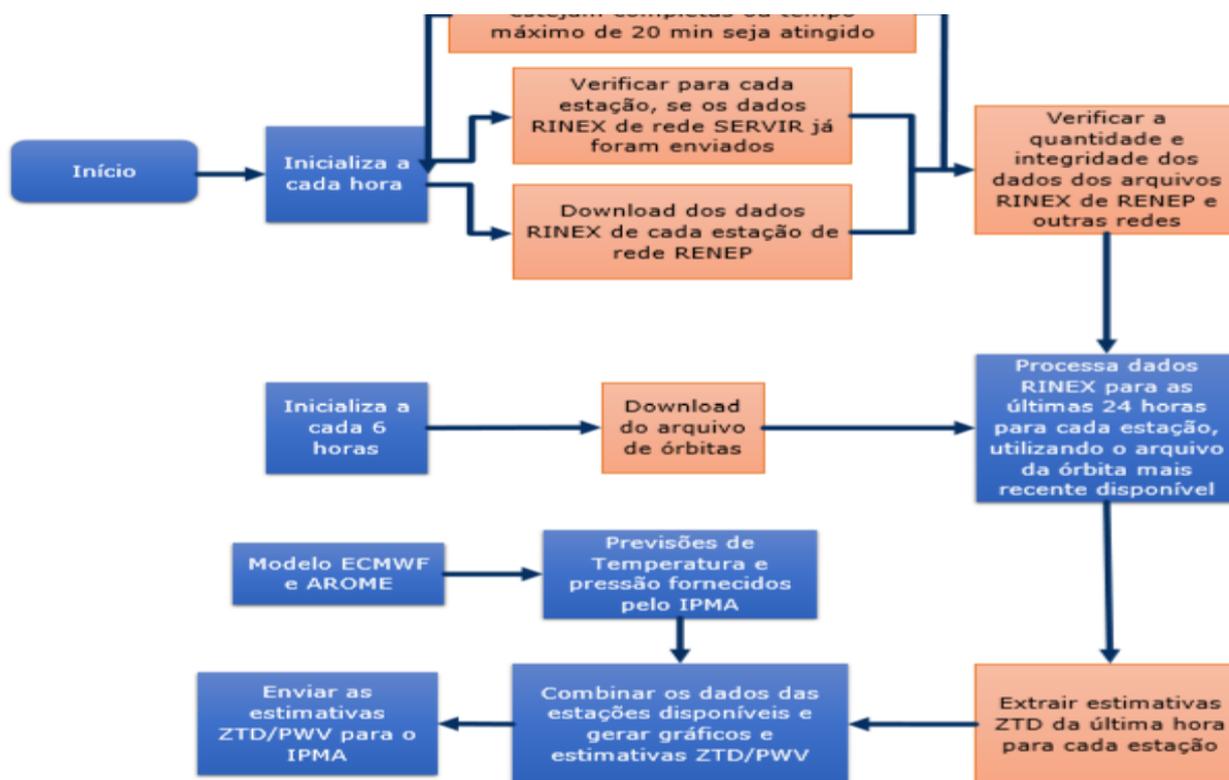
O primeiro desafio que se colocou à equipa do IPMA foi fornecer à UBI dados de pressão e temperatura nas estações de GNSS com o maior rigor possível já que as estações GNSS atualmente não dispõem de barómetro nem termómetro. Para isso dois modelos são analisados: modelo global ECMWF com uma resolução de 16 km e o modelo AROME de grelha mais fina, com uma resolução de 2,5 km. O AROME é um modelo de escala convectiva não hidrostático, é executado com as condições iniciais do ARPEGE/ALADIN e tem 2 saídas disponíveis às 8/20 UTC. O modelo ECMWF também corre duas vezes por dia, estando os dados disponíveis às 6/18.

Procedeu-se à validação do modelo AROME e ECMWF comparando com observações de estações meteorológicas, de forma a verificar se as estimativas de pressão à superfície e temperatura são aceitáveis, e também para comparar a qualidade de ambos os modelos.

Na operacionalização final do processo, determinar-se-á qual dos modelos será utilizado, com base no compromisso entre a hora a que os dados estão disponíveis e os resultados das respectivas validações.

As principais tarefas do trabalho conjunto entre a UBI e IPMA, encontra-se estruturado na Figura 2.

Figura 2- Estrutura das tarefas realizadas pelo SEGAL e pelo IPMA: Esquema do processamento horário para estimar ZTD/PWV em tempo quase real das observações RINEX usando o software GIPSY-OASIS com a aproximação PPP (Precise Point Positioning).



### Validação das estimativas de temperatura e pressão

O método de validação baseou-se na comparação entre dados observados e modelados, relativamente às variáveis meteorológicas, temperatura (a 2 metros) e pressão atmosférica à superfície. Dois modelos encontram-se em testes: o modelo global ECMWF e modelo AROME de grelha mais fina, com resolução de 16 e 2,5 km respetivamente.

Como se pretende obter resultados de vapor de água a cada 5 minutos procedeu-se à validação com intervalos de tempo o mais próximo possível desse valor, que neste caso corresponde ao intervalo de tempo de observação das estações IPMA (10 minutos). No entanto os valores previstos pelos modelos AROME e ECMWF apresentam resolução horária, sendo necessária a utilização de algum método de interpolação para a obtenção dos períodos intermédios.

Com o objetivo de validar as estimativas dos modelos, são utilizadas observações de 10 estações meteorológicas do IPMA, para o mês de Abril e Maio de 2015, bem distribuídas espacialmente em Portugal Continental. Os dados dos modelos foram interpolados para as estações no espaço e no tempo, de modo a obterem-se valores de pressão atmosférica e temperatura à superfície de ambos os modelos para cada 10 minutos. Na interpolação no espaço, foram tentados dois métodos: seleção do ponto do modelo mais próximo à localização da estação IPMA e interpolação bilinear. Compararam-se ambos os métodos através de vários com o modelo AROME, que representa melhor o terreno, mesmo para estações com maiores altitudes, acima dos 500 metros.

índices estatísticos, e foi escolhido o método com melhores resultados.

Devido à diferença de altitudes entre a superfície virtual (modelo) e real (observações) do terreno, foi necessário efetuar correções da temperatura e da pressão modeladas para a altitude correspondente às estações meteorológicas. Na correção da temperatura, o gradiente vertical utilizado é de  $-6,5K/km$ , valor correspondente a um processo adiabático húmido [Hagemann et al., 2003]. A pressão foi corrigida utilizando a equação hipsométrica.

Os índices estatísticos analisados na comparação entre dados modelados e observados foram o MAE (Mean Absolute Error), Viés, RMSE (Root mean square error) e correlação.

As previsões meteorológicas para o período entre as 00h e as 12h são obtidas da run das 12h do dia anterior, enquanto que para o período seguinte, isto é, das 12h às 24h, são obtidas da run das 00h do próprio dia.

### Resultados e discussão

A altitude das estações meteorológicas e a diferença entre as altitudes reais e de ambos os modelos encontram-se na tabela 1.

Verifica-se a maior suavização do modelo ECMWF, com maior diferença de altitudes do terreno real (observações) e virtual (modelo), quando comparado

Estação IPMA	Altitude (Obs)	OBS-AROME	OBS-ECMWF
--------------	----------------	-----------	-----------

Bragança	690	15,0	-37,3
V.Castelo	48	27,6	-63,1
Vilareal	561	42,5	-55,4
Viseu	636	52,8	124,9
Coimbra	170	30,2	-22,7
C.Branco	386	18,2	142,2
Lisboa	104	31,5	-8,3
Évora	246	2,6	-13,6
Beja	246	16,0	88,1
Faro	8	-1,4	-40,8

Tabela 1 - Altitude das estações meteorológicas e modelo.

Apresentam-se as tabelas de comparação do método de interpolação bilinear e método do ponto mais próximo, na comparação entre as estações IPMA e o modelo AROME e ECMWF, para a pressão na Tabela 2 e para a temperatura na **Error! Reference source not found.**

		Ponto Interpolação Próximo	
AROME	RMSE(hPa)	0,93	1,06
	MAE(hPa)	0,84	1,20
	CORREL	0,99	0,99
ECMWF	RMSE(hPa)	1,09	1,06
	MAE(hPa)	0,88	0,87
	CORREL	0,98	0,98

Tabela 2- Estatísticas das estações IPMA para método do ponto mais próximo e interpolação bilinear para a pressão.

Na comparação entre o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear, verifica-se que a correlação é igual utilizando ambos os métodos.

Para o modelo ECMWF o resultado não é conclusivo porque se tem estações onde foram claramente melhores os resultados utilizando o método da interpolação bilinear e outras estações cujo método da seleção do ponto mais próximo apresentou melhores resultados. Na Tabela 4, onde se apresenta um resumo dos resultados para todas as estações, verifica-se que os resultados não mostram melhorias significativas, utilizando um ou outro método.

Apesar das diferenças não serem significativas analisando o modelo ECMWF, verifica-se que no caso do modelo AROME, para a pressão, os resultados são claramente mais positivos utilizando o método da interpolação bilinear, com menores valores de erro MAE e RMSE.

Foi seleccionado o método de interpolação bilinear como o melhor método, e por isso validou-se este método comparando o modelo AROME e ECMWF com as observações nas dez estações IPMA separadamente, apresentando-se os resultados nas tabelas 4 e 5

		Interpolação Ponto Próximo	
AROME	RMSE(°C)	1,52	1,54
	MAE(°C)	1,13	1,18
	CORREL	0,96	0,96
ECMWF	RMSE(°C)	1,77	1,86
	MAE(°C)	1,41	1,47
	CORREL	0,94	0,94

Tabela 3 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear no caso da temperatura.

Est.IPMA	RMSE		MAE		VIÉS		CORRELAÇÃO	
	AROME	ECMWF	AROME	ECMWF	AROME	ECMWF	AROME	ECMWF
Bragança	1,38	1,59	1,05	1,31	0,07	-0,48	0,97	0,96
V.Castelo	1,95	1,79	1,07	1,41	0,97	0,11	0,92	0,90
Vila Real	1,24	1,61	0,96	1,30	0,17	-0,70	0,97	0,96
Viseu	1,63	1,74	1,23	1,35	-0,04	-0,48	0,95	0,95
Coimbra	1,44	1,70	1,07	1,32	-0,05	-0,20	0,96	0,94
C.Branco	1,38	1,83	1,01	1,45	0,45	-0,87	0,98	0,96
Lisboa	1,24	1,68	0,95	1,37	0,40	-0,95	0,97	0,96
Évora	2,09	2,11	1,65	1,73	1,30	0,12	0,97	0,94
Beja	1,43	2,11	1,12	1,72	0,23	-0,49	0,97	0,95
Faro	1,47	1,58	1,16	1,18	-0,40	-0,64	0,95	0,92

Tabela 4 - Análise estatística utilizando interpolação bilinear no caso da temperatura

Est.IPMA	RMSE		MAE		VIÉS		CORRELAÇÃO	
	AROME	ECMWF	AROME	ECMWF	AROME	ECMWF	AROME	ECMWF

Bragança	1,14	1,21	1,04	0,99	-1,01	-0,91	1,00	0,99
V.Castelo	1,46	0,82	1,36	0,66	-1,34	-0,51	0,99	0,99
Vila Real	0,47	1,56	0,36	1,21	0,09	0,45	1,00	0,96
Viseu	0,74	0,74	0,64	0,60	-0,60	0,50	1,00	0,99
Coimbra	1,30	0,80	1,22	0,65	-1,22	-0,15	0,99	0,98
C.Branco	0,54	1,85	0,44	1,46	0,30	-1,40	0,99	0,95
Lisboa	1,01	1,24	0,92	1,00	-0,92	-0,92	0,99	0,98
Évora	0,50	0,87	0,40	0,71	-0,26	-0,63	0,99	0,99
Beja	1,10	0,73	1,02	0,59	-1,02	-0,47	0,99	0,99
Faro	1,04	1,10	0,96	0,96	-0,95	-0,95	0,99	0,99

Tabela 5- Análise estatística utilizando interpolação bilinear no caso da temperatura

Ao analisar-se o desempenho do modelo AROME e ECMWF na previsão da temperatura verifica-se que o AROME apresenta melhores resultados para todos os parâmetros analisados, com menores valores de erro absoluto médio, e maiores valores de correlação, apesar de pouco significativas as diferenças para o modelo ECMWF. O AROME apresenta um valor médio de erro considerando todas as estações de 1,13 °C, enquanto que o ECMWF apresenta um erro médio de 1,41 °C. Verifica-se que o modelo AROME para a maior parte das estações sobrestima a temperatura, enquanto que o modelo ECMWF prevê na maior parte dos casos uma menor temperatura que a verificada. Os valores de correlação são elevados, com valores igual ou acima de 90%. O modelo ECMWF apresenta os seus piores resultados de correlação para Faro e Viana do Castelo, estações estas que se encontram perto do mar, e onde a previsão é mais complicada, porque há maiores variações espaciais da temperatura e a depender fortemente da direção do vento.

Verifica-se para o caso da pressão estações onde o AROME apresenta melhores resultados e outras estações em que o ECMWF prevê melhor a pressão. O valor médio de erro, considerando as 10 estações analisadas no período de Abril e Maio de 2015, apresenta-se como um bom resultado, com 0,84 hPa e 0,88 hPa para o AROME e ECMWF, respetivamente. Em termos de correlação são excelentes os resultados, principalmente o AROME, com correlações praticamente perfeitas ( $r \approx 1$ ).

Verifica-se também que ambos os modelos subavaliem a pressão atmosférica na maior parte das estações.

### Conclusões

O objetivo deste projeto passa pela determinação do vapor de água precipitável em tempo quase real, de forma a ser mais uma ferramenta na complicada tarefa de previsão da precipitação, principalmente nos eventos de precipitação convectiva.

Um dos principais objetivos da equipa do IPMA passa pelo envio de dados de pressão à superfície para a UBI, de forma a poderem ser processados, e obter dados de vapor de água precipitável. Para verificar se as estimativas que são enviadas, apresentam fiabilidade, validaram-se os dados de pressão e temperatura comparando com medições das estações do IPMA.

Devido à maior parte das estações GNSS não apresentarem dados de pressão e temperatura, são utilizadas estimativas a partir de previsões do modelo global ECMWF e modelo AROME. De forma a verificar se é aceitável a utilização dos valores previstos por modelos, procedeu-se à comparação entre registos nas estações e modelados.

O modelo AROME com uma resolução de 2,5 km, apresenta melhores resultados na previsão da temperatura, enquanto que para o caso da pressão, parâmetro com menores variações espaciais que a temperatura, os resultados estatísticos são praticamente idênticos utilizando o modelo AROME ou ECMWF.

Os valores de correlação são muito bons, nomeadamente no modelo AROME, sendo praticamente perfeitos na previsão da pressão à superfície.

O facto de se ter correlações quase perfeitas entre observações e modelos ( $r \approx 1$ ) leva-nos a concluir que utilizando estimativas de pressão e temperatura a partir do modelo AROME ou ECMWF, as variações de vapor de água não estarão comprometidas, quando comparando com valores de pressão e temperatura exatos. Esta é uma grande mais valia, na medida que uma das grandes dificuldades na previsão da precipitação por parte dos modelos numéricos passa não só na sua quantidade, como nas suas variações temporais.

As soluções estimadas de vapor de água serão comparadas com diversas observações, nomeadamente radiosondas e de perfiladores a bordo de satélites de órbita polar, de forma a poder contribuir na melhoria da previsão de nowcasting em Portugal.

### Referências

- Hagemann S, Bengtsson L, Gendt G. 2003. On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements. *J. Geophys. Res.* **108**:4678.
- Heise S, Bender M, Beyerle G, Dick G, Gendt G, Schmidt T, Wickert J. 2009. Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initial results from a global 5-minute data set. *Ann. Geophys.* **27**(7): 2851-2859.
- Ortiz de Galisteo JP, Cachorro V, Toledano C, Torres B, Laulainen N, Bennouna Y, de Frutos A. 2011. Diurnal cycle of precipitable water vapor over Spain. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**: 948-958.