



**Tiago Antunes  
Machado**

**Implementação e validação de um produto de vapor de água integrado com base em estimativas do sistema de navegação global por satélite no IPMA**





**Tiago Antunes  
Machado**

**Implementação e validação de um produto de vapor de água integrado com base em estimativas do sistema de navegação global por satélite no IPMA**

Relatório de Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor José Manuel Henriques Castanheira, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e do Doutor João Paulo Martins, investigador postdoc do Instituto Português do Mar e da Atmosfera.



**O júri / the jury**

Presidente

**Professor Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente

**Professor Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha**

Professor Associado c/Agregação da Universidade de Aveiro

Vogal - Orientador

**Professor Doutor José Manuel Henriques Castanheira**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Agradeço ao Professor Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva e ao Professor Doutor José Manuel Henriques Castanheira pela oportunidade, contacto e sugestão de fazer um projeto no IPMA.

Agradeço ao Doutor João Paulo Martins pela orientação, disponibilidade e sugestões ao longo deste projeto.

Agradeço ao Gonçalo Rodrigues pela ajuda e tempo despendido nesta ultima fase do projeto. Ao Clife Pedro pelos seus conselhos.

Agradeço a Bruna Cardoso pelo apoio e paciência que teve durante o período da realização deste projeto.

Aos meus amigos por todo apoio ao longo deste percurso.

Por último a minha família que me acompanhou durante este percurso e os meus pais pelo esforço de tonar isto possível.



## Palavras-chave

GNSS; Vapor de água; validação; técnicas de interpolação; ECMWF; AROME; AIRS; radiossondas

## Resumo

O vapor de água afeta a recepção do sinal de Sistema Global de Navegação por Satélite Sistema (GNSS) e, como tal, as observações GNSS podem ser utilizadas para estimar a quantidade de vapor de água na atmosfera. Esta técnica de observação tem uma boa resolução de tempo (alguns minutos), e o aumento significativo do número de estações de GNSS nos últimos anos em Portugal permite uma boa cobertura espacial do território. Como esta tecnologia baseia-se em frequências de micro-ondas, as estimativas são possíveis em qualquer situação meteorológica. No entanto, estes dados não são ainda usados para a previsão do tempo em Portugal, e dessa forma no contexto do NUVEM projeto da FCT pretende-se implementar e validar os métodos para calcular o atraso zenital troposférico (ZTD) e o vapor de água precipitável correspondente (PWV) em tempo quase real, e implementar o sistema GNSS na previsão do tempo feita pelo IPMA.

Nos últimos anos, as estimativas de vapor de água verticalmente integrada do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) foram incorporadas nas atividades nowcasting nos principais centros de previsão de tempo, uma vez que proporcionam todas as condições meteorológicas, informações resolução temporal e espacial elevada. Neste trabalho vamos explorar os pontos fortes e fracos deste tipo de dados, comparando estas estimativas contra outros conjuntos de dados de *state-of-art* do mesmo parâmetro. Medições locais podem ser obtidas utilizando radiossondas que são severamente limitados em termos de amostragem espacial e temporal. Os dados de satélite com sensor infravermelhos fornecem as melhores estimativas sobre regiões oceânicas, mas sofrem de contaminação de nuvens e grandes incertezas na emissividade da superfície sobre a terra com fraca resolução temporal. Para superar essas limitações, os modelos são frequentemente utilizados para nowcasting embora seja bem conhecido que eles não conseguem representar fenômenos de pequena escala, tais como inundações.



## **Keywords**

GNSS; Water vapour; validation; interpolation techniques ; ECMWF; AROME; AIRS; radiosondes

## **Abstract**

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.

In recent years, the Global Navigation Satellite System (GNSS) estimates of vertically-integrated water vapour have been incorporated in nowcasting activities in major weather forecast centers, since they provide all-weather, high temporal and spatial resolution information. In this work we explore the strengths and weaknesses of this type of data, by comparing these estimates against other state-of-the-art datasets of the same parameter. Local measurements may be obtained using radiosondes which are severely limited in terms of temporal and spatial sampling as they are very expensive. Satellite data from infrared sounders provide the best estimates over remote oceanic regions but they suffer from cloud contamination, large surface emissivity uncertainties over land and poor time sampling. To overcome these limitations, models are often used for nowcasting although it is well-known that they fail to represent small scale phenomena such as flash floods.



# Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de acrónimos	vii
<b>1. Introdução</b>	
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos gerais.....	3
1.3. Organização do documento.....	4
<b>2. Processamento do sistema GNSS</b>	
2.1. Caracterização da área de estudo.....	4
2.2. Descrição metodológica do sistema GNSS.....	6
2.3. Modelos de previsão da pressão e temperatura.....	7
2.3.1. <i>AROME</i>	
2.3.2. <i>ECMWF</i>	
2.4. Correção de temperatura com altitude.....	8
2.5. Correção de pressão com altitude.....	9
2.6. Interpolação espacial e temporal.....	9
<b>3. Validação da pressão e temperatura</b>	10
3.1. Resultados e discussão da validação da pressão e temperatura	
<b>4. Validação do vapor de água precipitável</b>	14
4.1. Dados utilizados na validação.....	14
4.1.1. <i>Radiossondas</i> .....	14
4.1.2. <i>Sensor AIRS a bordo do satélite MetOp</i> .....	14
4.1.3. <i>Previsão operacional do ECMWF</i> .....	15
4.2. Resultados.....	16
<b>5. Conclusões e trabalho futuro</b>	21
Bibliografia	23



## Lista de Figuras

Figura 1- Mapa de estações GNSS disponíveis na Península Ibérica ocidental (esquerda). Mapa das estações usadas para estudo de validação do sistema (direita).	5
Figura 2- Estrutura das tarefas realizadas pelo SEGAL e pelo IPMA: Esquema do processamento horário para estimar ZTD/PWV em quase tempo real das observações RINEX usando o software GIPSY-OASIS com a aproximação PPP (Precise Point Positioning).	6
	8
Figura 3 - (esquerda) Representação da orografia do modelo AROME, (centro) Representação da orografia do modelo ECMWF, (direita) Orografia de Portugal continental baseada nos dados do Instituto Geográfico Português.	
Figura 4 - Representação dos parâmetros das radiossondas medidos/calculados na vertical no dia 18 de julho de 2013 as 12h.	14
Figura 5 - PWV (mm) para o dia 15 de abril de 2015 13UTC (dados AIRS)	15
Figura 6 - PWV (mm) para o dia 15 de abril de 2015 13 UTC (previsão operacional ECMWF)	16
Figura 7 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, radiossondas, AIRS e estimativas de 5 min GNSS-PWV para o mês de Abril de 2015 com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF.	17
Figura 8 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, AIRS e estimativas de 5 min GNSS-PWV para o mês de Abril de 2015 para as estações em estudo com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF.	20
Figura 9 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, AIRS e estimativas 5-min GPS para o mês de Abril de 2015 com a entrada de dados de pressão e temperatura do AROME.	21



## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Coordenadas geográficas dos recetores GNSS em estudo.	5
Tabela 2 - Coordenadas geográficas das estações do IPMA	
Tabela 3 – Estatísticas médias das estações IPMA estudadas para o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear no caso da pressão.	10
Tabela 4 - Estatísticas médias das estações IPMA estudadas para o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear no caso da temperatura	11
Tabela 5 – Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo AROME aplicando a interpolação bilinear no caso da pressão.	12
Tabela 6 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo AROME aplicando a interpolação bilinear no caso da temperatura.	12
Tabela 7 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo ECMWF aplicando a interpolação bilinear no caso da pressão.	13
Tabela 8 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo ECMWF aplicando a interpolação bilinear no caso da temperatura.	13
Tabela 9 – Resultados estatísticos da comparação de PWV do ECMWF, Radiossondas e AIRS com os dados GNSS-PWV para Abril de 2015.	17
Tabela 10 - Dados estatísticos da comparação dados de PWV do ECMWF e AIRS com o GNSS-PWV para as estações em estudo com input de pressão e temperatura do ECMWF.	18
Tabela 11 – Dados estatísticos da comparação dados de PWV do ECMWF e AIRS com o GNSS-PWV para as estações em estudo com input de pressão e temperatura do AROME.	19



## Lista de Acrónimos

<i>AIRS</i>	<i>Atmospheric Infrared Sounder</i>
<i>ALADIN</i>	<i>Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement Inter-National</i>
<i>AROME</i>	<i>Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle</i>
<i>ARPEGE</i>	<i>Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle</i>
<i>e</i>	<i>Pressão parcial de vapor de água</i>
<i>ECMWF</i>	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
<i>EUMETSAT</i>	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
<i>e<sub>w</sub></i>	<i>Pressão de saturação do vapor de água</i>
<i>FCT</i>	<i>Fundação para a Ciência e Tecnologia</i>
<i>GLONASS</i>	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>h</i>	<i>Altura estação</i>
<i>HR</i>	<i>Humidade relativa</i>
<i>IASI</i>	<i>Infrared Atmospheric Sounding Interferometer</i>
<i>IGN</i>	<i>Instituto Geográfico Nacional (Espanha)</i>
<i>IGS</i>	<i>International GNSS Service</i>
<i>IPMA</i>	<i>Instituto Português do Mar e da Atmosfera</i>
<i>JPL</i>	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
<i>λ</i>	<i>Latitude</i>
<i>MESO-NH</i>	<i>Mesoscale Non-Hydrostatic model</i>
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NUVEM</i>	<i>Novos métodos para usar estimativas GNSS-PWV na Meteorologia de Portugal</i>
<i>NWP</i>	<i>Modelos de previsão numerica (Numerical weather predictions)</i>
<i>P</i>	<i>Pressão atmosférica</i>
<i>PPP</i>	<i>Precise Point Positioning</i>
<i>P<sub>s</sub></i>	<i>Pressão a superfície</i>
<i>PWV</i>	<i>Vapor de água precipitável (Precipitable water vapour)</i>
<i>q</i>	<i>Humidade específica</i>
<i>R</i>	<i>Constante dos gases ideais</i>
<i>r</i>	<i>Razão de mistura</i>

$r$	<i>Razão de mistura</i>
$\rho$	<i>Densidade de um gás</i>
$\rho_{H_2O}$	<i>Densidade da água líquida</i>
$\rho_{ar}$	<i>Densidade do ar</i>
$\rho_v$	<i>Densidade do vapor de água</i>
<i>RINEX</i>	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
$R_v$	<i>Constante dos gases ideais para o vapor de água</i>
<i>SEGAL</i>	<i>Space &amp; Earth Geodetic Analysis Laboratory</i>
$T$	<i>Temperatura absoluta</i>
<i>TEC</i>	<i>Total Electron Content</i>
$T_m$	<i>Temperatura média verticalmente integrada</i>
$T_{mc}$	<i>Temperatura média entre a temperatura corrigida e a temperatura do modelo</i>
$T_s$	<i>Temperatura a superfície</i>
<i>UBI</i>	<i>Universidade da Beira Interior</i>
<i>UTC</i>	<i>Tempo universal Coordenado (Universal Time Coordinated)</i>
<i>ZHD</i>	<i>Atraso zenital hidrostático (Zenith Hydrostatic delay)</i>
<i>ZTD</i>	<i>Atraso zenital troposférico (Zenith Tropospheric Delay)</i>
<i>ZWD</i>	<i>Atraso zenital húmido (Zenith Wet Delay)</i>

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

Atualmente existe uma variedade de meios para estimar a distribuição vertical e horizontal do vapor de água. Os balões meteorológicos ou radiossondas dispõem de sensores para as principais variáveis meteorológicas, fornecendo os perfis verticais de temperatura, humidade relativa (através da medição da temperatura do ponto de orvalho – temperatura à qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado líquido), pressão e vento, desde a superfície até a estratosfera, enviados para o solo via sinal de rádio. As medidas de temperatura e humidade relativa são dadas com uma precisão de aproximadamente 0.2 °C e 3.5%, respetivamente, com um desempenho mais fraco em temperaturas frias e regiões secas [Elliot and Gaffen, 1991]. Embora as medições realizadas pelas radiossondas forneçam uma boa resolução vertical, as radiossondas têm uma série de desvantagens. O custo desses dispositivos restringe o número de lançamentos e limita o número de estações onde são lançadas. Em Portugal só um balão é lançado cada dia às 12 UTC 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 da temperatura ou ventos [Ortiz de Galisteo et al., 2011].

Os perfiladores a bordo dos satélites de órbita polar como o IASI (no MetOp da European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) e o Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS), a bordo do satélite Aqua, da National Aeronautics and Space Administration (NASA) permitem obter essa informação com uma resolução das poucas dezenas de quilómetros, num total de 4 vezes por dia, nas suas passagens ascendentes e descendentes. Estes instrumentos, tal como a grande parte do conteúdo de informação obtido através dos canais do infravermelho, são por isso condicionados pela presença de nuvens. Os atuais sistemas de observação remota de alta resolução temporal (radar meteorológico e satélite geostacionário) apenas permitem detetar de forma fiável sistemas convectivos numa fase madura do seu ciclo de vida, quando existe água líquida. Estas situações são normalmente precedidas de um acréscimo de instabilidade atmosférica e conteúdo em vapor de água.

Este trabalho foi efetuado no âmbito do projeto da FCT NUVEM (Novos métodos para usar estimativas GNSS-PWV na Meteorologia de Portugal – EXPL/GEO-MET/0413/2013), que resulta de uma 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). 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) [Bevis et al., 1992] no centro de previsão operacional do IPMA.

As estações de receção de sinal GNSS são equipamentos de fácil instalação e preço apelativo, funcionando na banda do micro-ondas em qualquer situação meteorológica, com uma resolução temporal de 5 min. O crescimento nos recentes anos dos recetores GNSS de alta precisão permite um estudo mais completo do PWV. Assim, medições através de recetores GNSS aparecem neste momento como uma das técnicas mais poderosas para o estudo do vapor de água [Hagemann et al., 2003; De Haan, 2006; Wang et al., 2007; Heise et al., 2009]. Estudos recentes usaram esta técnica para analisar o ciclo anual [Jin and Luo, 2009], ciclo diurno [Ortiz de Galisteo et al., 2011] e tendências a longo prazo [Nilson and Elgered, 2008] do vapor de água precipitável assim como na monitorização de episódios meteorológicos [Champollion et al., 2004; Seco et al., 2009] e na melhoria na previsão de precipitação [Marcus et al., 2007].

O GNSS é um sistema composto por uma constelação de satélites que é capaz de nos fornecer de forma autónoma a posição geoespacial e temporal numa escala global. Atualmente dois sistemas de GNSS são usados operacionalmente: Global

Positioning System (GPS) dos Estados Unidos, e o Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) da Rússia. Outros dois sistemas de GNSS estão numa fase de desenvolvimento: GALILEO da Europa e o Chines COMPASS e que serão complementares aos dados atuais para uma maior precisão. As posições dos satélites no tempo (as órbitas) da constelação de satélites são fornecidas pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA e processadas pelo International GNSS Service (IGS) para gerar órbitas ultra-rápidas quatro vezes por dia, com a melhor qualidade possível. O IGS coleta, arquiva e distribui observações GNSS com precisão suficiente para satisfazer os requisitos necessários à utilização destes dados, rondando a precisão das orbitas fornecidas os 3-5 centímetros. No caso da meteorologia por GNSS, o IGS fornece a estimativa do atraso troposférico zenital (ZTD) do sinal e mapas globais de conteúdo de iões na ionosfera (TEC – Total Electron Content).

Em Portugal, existem duas redes de recetores GNSS de terra: 1) a rede ReNEP, mantida pela Direção-Geral do Território e 2) 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 ReNEP e SERVIR.

A determinação do PWV através dos recetores terrestres de GNSS é baseada no atraso de chegada do sinal emitido pelos satélites à superfície terrestre. Este atraso pode ser dividido numa componente ionosférica e noutra troposférica. O atraso ionosférico é dispersivo (i.e. depende da frequência). De modo a quantificar e eliminar o efeito da ionosfera no sinal [Brunner and Gu, 1991] os satélites GNSS transmitem em duas frequências. No caso do atraso troposférico, este é não dispersivo. O atraso na troposfera é determinado pelo índice de refração ao longo do trajeto do sinal. O índice de refração na atmosfera é função da temperatura, pressão e conteúdo em vapor de água. O vapor de água é o único gás na troposfera que tem um momento dipolar permanente, que contribui para uma componente dipolar da refratividade na atmosfera [Bevis et al., 1992, 1994]. Assim o atraso zenital troposférico (ZTD) pode ser dividido num atraso hidrostático (ZHD) associado ao momento de dipolo induzido, e um atraso húmido (ZWD) associado com o momento do dipolo permanente do vapor de água [Saastamoinen, 1972]. O ZTD é calculado a partir das atuais medições dos recetores de GNSS usando algoritmos de inversão complexa [Duan et al., 1996]. O ZHD é obtido conhecendo a pressão a superfície e o ZWD é obtido subtraindo o ZHD e ZTD. Posteriormente, o ZWD é transformado em PWV com base na média ponderada da temperatura. Aproximadamente 1 mm de PWV produz cerca de 6.35 mm de atraso, mas este fator oscila em torno de 20 % consoante a localização, a altitude, a estação do ano e condições meteorológicas [Bevis et al., 1994]. O primeiro desafio que se pôs 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. Uma variação de 1 hPa na pressão a superfície corresponde a 0.33-0.37 mm no PWV e uma incerteza de 5 K na temperatura corresponde a 1.7-2.0% de PWV [Hagemann et al., 2003].

## 1.2 Objetivos gerais

O objetivo principal do projeto é operacionalizar o uso de estimativas GNSS-PWV para previsões a muito curto prazo (*nowcasting*) em Portugal. Nas estimativas GNSS fazem parte duas áreas científicas: Detecção remota e Geodesia realizado pelo SEGAL e Meteorologia e Clima efetuado no IPMA por isso uma troca sistemática de informação é necessária entre as duas instituições. No IPMA, o primeiro objetivo foi estimar a pressão e temperatura nas estações GNSS com o melhor rigor possível, visto que estas variáveis são *inputs* fundamentais para a conversão de ZTD e PWV. Este passo foi seguido de uma operacionalização do envio destas variáveis para a UBI a fim de receber as estimativas PWV processadas pelo SEGAL. Uma vez recebidos os dados de GNSS-PWV da UBI é necessário fornecê-los em tempo real ao centro operacional de previsão do tempo do IPMA. Foram também produzidas *offline* séries temporais relativamente longas para a validação dos resultados com base nas fontes de dados de PWV existentes. De salientar que os resultados preliminares aqui apresentados são para o mês de

Abril de 2015 dado que o projeto se encontra precisamente na fase da validação dos GNSS-PWV e nesta fase apenas se dispõe de dados para o mês referido. Até ao término do projeto NUVEM em setembro de 2015, espera-se que séries temporais com cerca de quatro anos sejam usadas para uma validação mais robusta.

### 1.3 Organização do documento

Na secção 2.1 descreve-se a área de estudo, e em seguida, na secção 2.2 descreve-se a metodologia geral do sistema de processamento dos dados GNSS. Na secção 2.3, apresenta-se os modelos de previsão numérica ECMWF e AROME utilizados para a previsão de pressão e temperatura a ser enviada a UBI nas estações GNSS. Nas secções 2.4 e 2.5 descreveu-se as correções realizadas as previsões da temperatura e pressão com a orografia. No seguimento do documento, na secção 3.1 apresenta-se os resultados obtidos na validação da pressão e temperatura dos modelos considerando as medições *insitu* das estações meteorológicas do IPMA. O capítulo 4 visa validar as estimativas obtidas de GNSS-PWV apresentando na secção 4.1 descrevem-se as fontes de PWV disponíveis, seguido na secção 4.2 da validação das estimativas GNSS-PWV obtidos para o mês de Abril de 2015 para diferentes estações distribuídas pelo território Português. O documento acaba com as devidas conclusões e trabalhos futuros.

## 2 Processamento do sistema GNSS

Água na forma de vapor é um dos mais importantes constituintes da atmosfera. A quantidade de vapor varia amplamente no espaço e no tempo, devido a grande variedade de fontes de evaporação, sublimação e condensação do ciclo hidrológico. Aproximadamente metade do vapor de água total na atmosfera encontra-se abaixo dos 2000 metros de altitude, e só uma diminuta fração se encontra na tropopausa. O vapor de água é importante não só como matéria-prima de nuvens, chuva ou neve, mas também como veículo para o transporte de energia (sob a forma de calor latente) e regulador da temperatura planetária através de absorção e emissão de radiação. A quantidade de vapor de água pode ser caracterizada de diferentes formas. A equação dos gases ideais é dada por:

$$P = \rho \frac{R}{M} T, \quad (1)$$

onde  $P$  é a pressão em Pa,  $\rho$  é a densidade do gás,  $M$  é a massa molar do gás,  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos ( $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) e  $T$  a temperatura absoluta. No caso do vapor de água, a equação (1) pode escrever-se como:

$$e = \rho_v R_v T, \quad (2)$$

em que  $e$  a pressão parcial de vapor de água,  $\rho_v$  é a densidade do vapor de água e  $R_v$  é a constante universal dos gases perfeitos para o vapor de água ( $R_v = 461.51 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). A pressão de vapor à qual ocorre a saturação e conseqüente condensação (representada por  $e_w$ ) é dada pela equação de Clausius-Clayperon, cuja solução analítica não existe, pelo que de acordo com Buck [1981], se pode aproximar numericamente por:

$$e_w = [1,0007 + (3,46 \cdot 10^{-6} P)] (6,1121 e^{\frac{17,502 T}{240,97+T}}), \quad (3)$$

onde excepcionalmente,  $T$  vem em °C. A razão entre a pressão parcial de vapor e a pressão de vapor de saturação é a humidade relativa, dada por:

$$HR = \frac{e}{e_w} \quad (4)$$

A razão de mistura é definida como a razão entre a massa de vapor e a massa de ar seco e pode mostrar-se que é dada por:

$$r = \frac{0.622e}{p - e} \quad (5)$$

A humidade específica é a razão entre a massa de vapor e a massa de ar total (ar seco e vapor). Pode mostrar-se que é dada por:

$$q = \frac{r}{1 + r} \quad (6)$$

O conhecimento preciso da distribuição do vapor de água na atmosfera é importante para as previsões meteorológicas a diferentes escalas temporais. A distribuição temporal e espacial deste campo tem uma forte variabilidade. Neste trabalho, pretende desenvolver-se um produto de água precipitável (*PWV*) que quantifica o vapor de água contido numa coluna vertical de atmosfera e que é dado por:

$$PWV = \frac{1}{\rho_{H_2O}g} \int_0^{P_s} q \, dP, \quad (7)$$

onde  $\rho_{H_2O}$  é a densidade da água líquida,  $g$  é a aceleração da gravidade ( $g = 9.80665 \text{ m.s}^{-1}$ ) e  $P_s$  é a pressão à superfície. Representa a massa por metro quadrado de água líquida medida se o vapor de água fosse subitamente condensado a superfície. Multiplicando pela densidade da água obtemos o vapor de água precipitável em unidades de comprimento, ou seja  $1 \text{ kg/m}^2 = 1 \text{ mm}$  ou  $1 \text{ g/cm}^2 = 10 \text{ mm}$ .

## 2.1 Caracterização da área de estudo

Só em Portugal Continental as redes SERVIR e ReNEP têm uma rede de recetores GNSS de 59 estações distribuídas pelo território. As redes espanholas ANDALUCIA, CASTILLA, EXTREMADURA e do IGN (Instituto Geográfico Nacional) fornecem dados de 88 estações do lado oeste da Espanha englobando assim a metade ocidental da Península Ibérica (a distribuição geográfica das estações encontra-se na Figura 1).

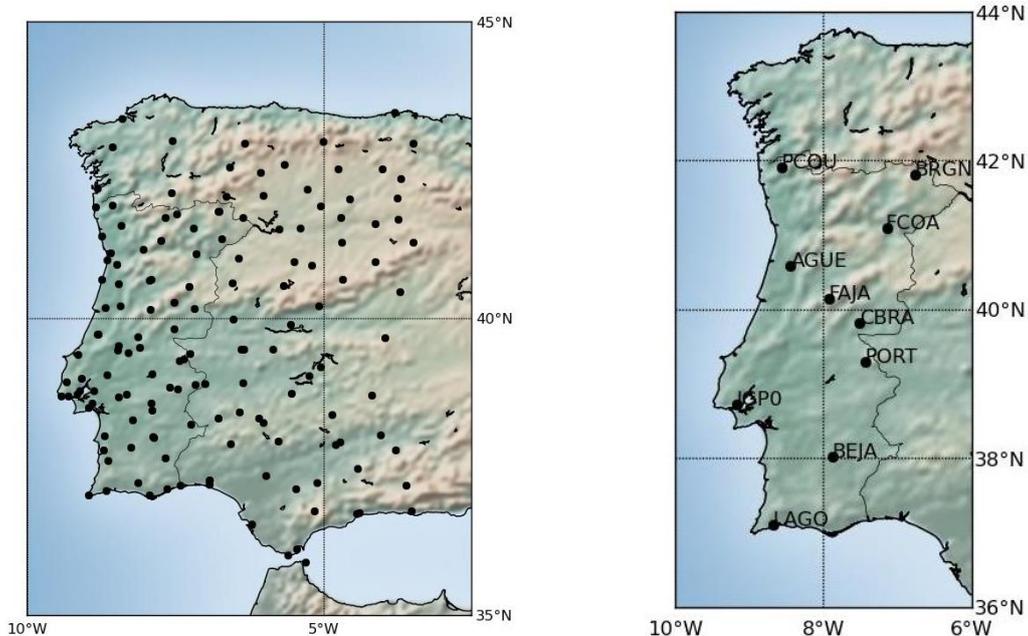


Figura 1- Mapa de estações GNSS disponíveis na Península Ibérica ocidental (esquerda). Mapa das estações usadas para estudo de validação do sistema (direita).

Estes recetores, como qualquer equipamento, precisam de manutenção e por vezes a recolha de dados torna-se descontínua. Foram selecionadas para o estudo de validação 9 estações distribuídas por Portugal continental de norte a sul, e da costa para o

interior a diferentes alturas e das quais se têm dados do mês de abril de 2015 completo (ver Figura 1 à direita e Tabela 1 para a descrição das coordenadas de cada estação). A única estação validada com as radiossondas é a estação do Instituto Geográfico Português (IGP0) que se encontra aproximadamente a 5 km da estação Gago-Coutinho.

Estações GNSS	Estações acrónimos	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)
Bragança	BRGN	41°8'	6°6'	780
Paredes de Coura	PCOU	41°3'	8°0'	443
Águeda	AGUE	40°4'	8°6'	103
Fajão	FAJA	40°9'	7°8'	789
C. Branco	CBRA	39°9'	7°0'	437
Portalegre	PORT	39°7'	7°6'	546
Beja	BEJA	38°0'	7°2'	307
Lagos	LAGO	37°6'	8°0'	63
Vila Nova de Foz Coa	FCOA	41°5'	7°8'	487
Instituto Geográfico Português	IGP0	38°4'	9°1'	179

Tabela 1 - Coordenadas geográficas dos recetores GNSS em estudo.

## 2.2 Descrição metodológica do sistema GNSS

O esquema de processamento implementado no âmbito deste projeto encontra-se representado na Figura 2. Os dados RINEX produzidos pelo sistema GNSS são enviados diretamente para o SEGAL pelos provedores de dados (no caso da rede SERVIR) ou é feito o *download* assim que estes estão disponíveis no caso das outras redes. Além disso, o processamento requer a transferência regular de órbitas ultra rápidas fornecidos pela IGS. Estas orbitas são recebidas 4 vezes por dia (03h UTC, 09h UTC, 15h UTC, 21h UTC) e contem 48h de dados, sendo que 24h são estimativas.

O cálculo do *PWV* é feito com base no atraso desde que o sinal é enviado pelo satélite até à chegada ao recetor (*ZTD*). Este atraso é dividido num atraso hidrostático (*ZHD*) e num atraso húmido (*ZWD*) [Bevis et al., 1992]:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (8)$$

De acordo com Yuan et al. [1993], o *ZHD* pode ser escrito em função da pressão a superfície:

$$ZHD = (2.2790 \pm 0.0024) \frac{P_s}{f(\lambda, h)}, \quad (9)$$

onde  $P_s$  é a pressão à superfície dado em hPa e  $f(\lambda, h)$  é um fator próximo da unidade que representa a variação da aceleração gravitacional com a latitude  $\lambda$  e a altura  $h$  em quilómetros [Saastamoinen, 1972]:

$$f(\lambda, h) = 1 - 0.0026 \cos\left(2\lambda \frac{\pi}{180}\right) - 2.8 \cdot 10^{-4} h, \quad (10)$$

O *ZWD* depende da quantidade de vapor de água na vertical e pode ser diretamente relacionado ao *PWV* pela equação:

$$PWV = \frac{\kappa ZWD}{\rho_{H_2O}}, \quad (11)$$

Com o coeficiente de proporcionalidade  $\kappa$ , dado por:

$$\frac{1}{\kappa} = 10^{-6} \left( \frac{c_1}{T_m} + c_2 \right) R_v, \quad (12)$$

onde  $c_1 = (3.776 \pm 0.030) \cdot 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ ,  $c_2 = (17 \pm 10) \text{ K hPa}^{-1}$ , e  $T_m$  é a temperatura média integrada verticalmente. Assumindo uma relação linear com a temperatura à superfície, é possível aproximar  $T_m$  a partir da temperatura da estação [Bevis et al. 1992]:

$$T_m \approx 70.2 + 0.72 T_s, \quad (13)$$

onde  $T_s$  é a temperatura à superfície na estação.

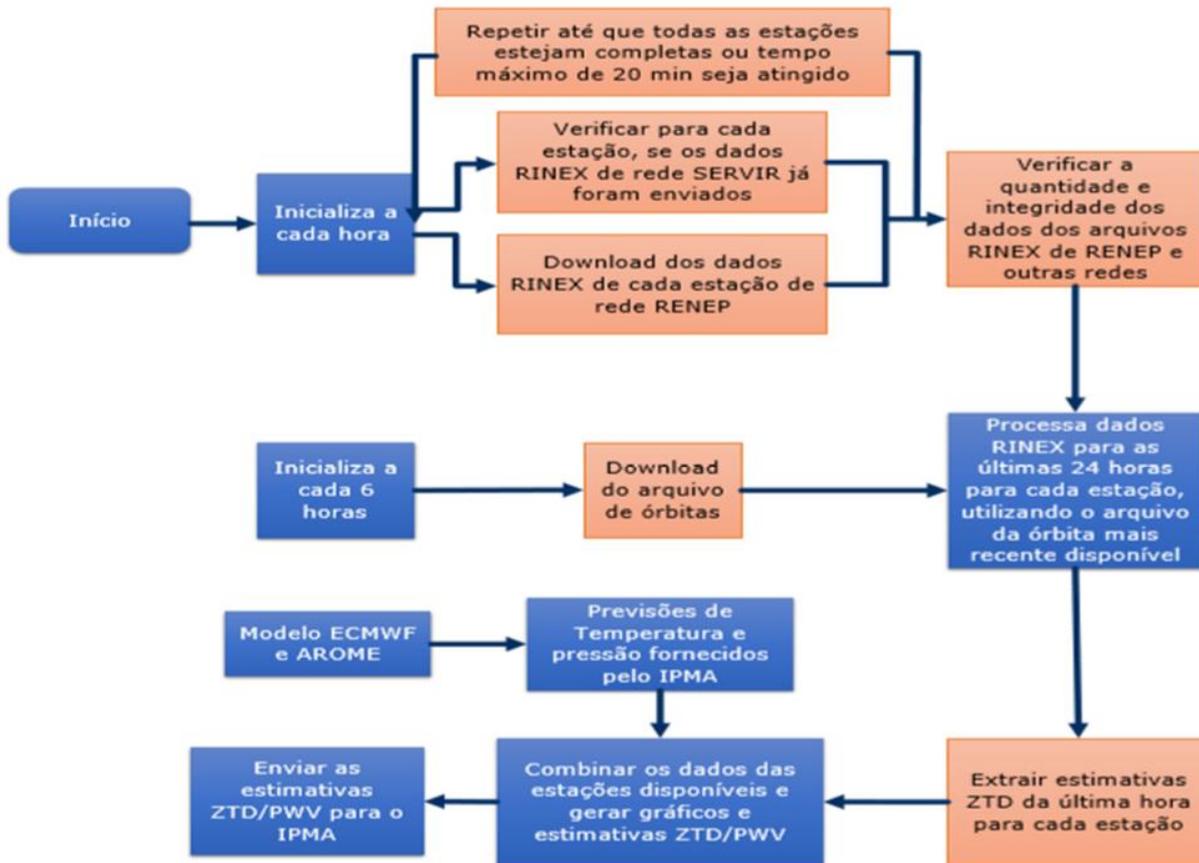


Figura 2- Estrutura das tarefas realizadas pelo SEGAL e pelo IPMA: Esquema do processamento horário para estimar ZTD/PWV em quase tempo real das observações RINEX usando o software GIPSY-OASIS com a aproximação PPP (Precise Point Positioning).

### 2.3 Modelos numéricos utilizados

De acordo com as equações (9) e (13), existe a necessidade de fornecer a pressão e temperatura nas estações GNSS com o maior rigor possível para diminuir o erro das estimativas de GNSS-PWV. Num cenário ideal, cada estação GNSS deveria incluir um termómetro e um barómetro. Como tal não se verifica, torna-se necessário estimar estes valores a partir de uma previsão de pressão e temperatura por modelos de previsão numérica do tempo (NWP) que cometa o menor erro. O IPMA tem acesso aos dados da previsão do modelo global ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) com resolução de 16 km, e processa operacionalmente o modelo de área limitada AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) de uma grelha horizontal mais fina, com resolução de 2.5 km. Neste trabalho pretende-se

escolher qual modelo fornecerá os dados de pressão e temperatura no seguimento da operacionalização. Ambos os modelos são corridos à 00 h e às 12 h UTC. De modo a evitar o período de *spin up*, não se usam as primeiras 12 horas das previsões para ambos os modelos.

### 2.3.1 AROME

O modelo AROME é um modelo de previsão numérica do tempo de área limitada e alta resolução (<http://www.cnrm.meteo.fr/arome/>), desenvolvido num consórcio liderado pela Météo-France. Trata-se de um modelo não hidrostático e foi construído a partir do núcleo da dinâmica do modelo ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement Inter-National) e do pacote de parametrizações físicas do modelo de investigação francês MESO-NH (*Mesoscale Non-hydrostatic model*) e cujas previsões ficam prontas no IPMA às 8/20 h UTC. A versão operacional do AROME utiliza condições fronteira do modelo global ARPEGE/ALADIN (ARPEGE: *Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*). O AROME amostra a atmosfera em 46 níveis verticais, e tem uma resolução horizontal de 2.5 km. A malha de estudo do modelo para Portugal continental esta delimitada pelos paralelos 43°N e 36°N e pelos meridianos 11.5°W e - 5.5°W. Os parâmetros utilizados são o da pressão a superfície o da temperatura do ar a 2 metros com saída de dados horária.

### 2.3.2 ECMWF

O modelo global atmosférico do ECMWF (<http://www.ecmwf.int/>) é um modelo de previsão numérica do tempo baseado em um conjunto de equações básicas de dois tipos: as de diagnóstico, que descrevem a relação entre a pressão estática, a densidade, a temperatura e a altura e as de prognóstico, que descrevem a evolução no tempo dos componentes do vento horizontal, pressão a superfície, temperatura e conteúdo de vapor de água de uma parcela de ar. As equações do modelo são discretizadas no espaço e tempo e resolvidas numericamente por um esquema de advecção semi-lagrangiano. Para a representação horizontal é usada uma grelha gaussiana reduzida, que mantém a distância entre pontos de modelo aproximadamente constante com a latitude, cuja resolução ronda atualmente ronda os 16 km.

A resolução vertical é mais fina na camada limite planetária, contando o modelo na sua configuração atualmente operacional com um total de 137 níveis verticais. O ECMWF fornece previsões operacionais com chegada dos dados ao IPMA as 7/19 h UTC, e análises operacionais que consistem na melhor caracterização possível da atmosfera no momento em que são produzidas pois assimilam um grande conjunto de dados observacionais. Estes campos são usados como condições iniciais do modelo de previsão numérica. Como é necessário que as estimativas de PWV sejam feitas assim que são disponibilizados os dados de ZTD, usam-se dados de previsão para a pressão e temperatura. No entanto, usaram-se as análises operacionais a fim de comparar o PWV fornecido pelo ECMWF e o GNSS-PWV. A área extraída do ECMWF esta delimitada pelos paralelos 50° N e 20° N e pelo meridianos 70° W e 10° E, para que se possam efetuar comparações entre os padrões espaciais produzidos pelas diferentes fontes de dados.

## 2.4 Correção da temperatura com a altitude

A orografia do ECMWF ao estar representada numa resolução espacial de 16 km é bastante mais suavizada quando comparada com o modelo AROME (Figura 3). Apesar de a orografia do AROME ser mais realística, também não representa a altura real das estações GNSS. Nesse sentido é necessária uma correção da temperatura devido ao facto das altitudes das estações e dos pontos de grelha respetivos não serem coincidentes, em geral.

A altitude dos recetores GNSS é conhecida, tal como a orografia dos modelos para o mesmo ponto. Para calcular a correção de temperatura com a altitude, é necessário introduzir o conceito de temperatura potencial [e.g. Holton, 2004]:

$$\theta = T \left( \frac{P_s}{P} \right)^{R/c_p}, \quad (14)$$

Onde  $c_p$  é o calor específico do ar seco a pressão constante ( $1004 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ ). A correção de temperatura pode obter-se com base na relação entre o *lapse rate* da temperatura (taxa de decréscimo da temperatura com a altura) e a taxa em que a temperatura potencial varia com a altura. Usando a equação hidrostática e a equação de estado para uma atmosfera em que a temperatura potencial é constante em altitude, o *lapse rate* é dado por:

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} \equiv \Gamma_d, \quad (15)$$

Sendo que o *lapse rate*  $\Gamma$  usado é de  $0.65\text{K}/100 \text{ m}$  típico para condições de adiabática [Hagemann et al., 2003]. Assim, aplica-se uma simples correção linear aos valores de temperatura do modelo, dada por:

$$T_{GNSS} = T_{modelo} + \Gamma (H_{GNSS} - H_{modelo}), \quad (16)$$

onde  $T_{modelo}$  e  $T_{GNSS}$  são as temperaturas de superfície do modelo e a temperatura ao nível da estação, respetivamente e  $H_{GNSS}$  e  $H_{modelo}$  as altitudes da estação e do modelo.

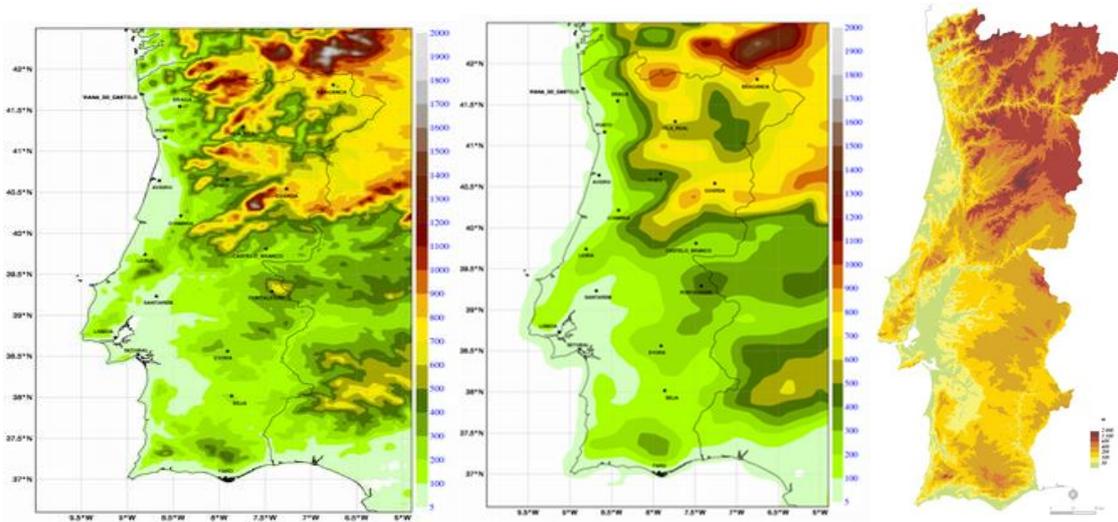


Figura 3 - (esquerda) Representação da orografia do modelo AROME, (centro) Representação da orografia do modelo ECMWF, (direita) Orografia de Portugal continental baseada nos dados do Instituto Geográfico Português.

## 2.5 Correção da pressão com a altitude

Na ausência de movimento vertical, a segunda lei de Newton reduz-se ao equilíbrio hidrostático:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho_{ar} g, \quad (17)$$

Sendo  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar. Esta aproximação é válida também para o caso de movimentos na vertical em que a aceleração da gravidade é muito maior que a aceleração vertical da parcela de ar.

Conjugando as equações (1) e (17) e aplicando o integral entre dois níveis distintos, deduz-se a equação hipsométrica, que permite corrigir a pressão entre a altitude da superfície do modelo e a da estação GNSS [Hagemann et al., 2003].

$$P_{GNSS} = \frac{P_{modelo}}{e^{\frac{g}{R T_{mc}}(H_{GNSS} - H_{modelo})}}, \quad (18)$$

Sendo  $T_{mc}$  a temperatura média entre a temperatura de superfície do modelo e a temperatura corrigida na estação.

## 2.6 Interpolação espacial e temporal

As coordenadas dos recetores GNSS não coincidem necessariamente com as coordenadas dos pontos de grelha dos modelos. Nesse sentido é preciso realizar uma interpolação espacial. Foram estudados dois métodos de interpolação: a interpolação bilinear e o método do ponto mais próximo. Este último consiste em atribuir ao valor da estação o valor do ponto mais próximo da grelha do modelo. Este método pode revelar-se vantajoso por exemplo junto à costa, situação na qual uma interpolação bilinear iria incluir informação de pontos de mar. Nesse caso, é aconselhado escolher o ponto mais próximo sobre terra para a interpolação. O método do ponto mais próximo poderia ter algum valor acrescentado para as estimativas do modelo AROME por ter uma grelha mais fina e perto da linha de costa.

O ECMWF sugere no guia de utilizador a utilização de a interpolação bilinear como interpolação espacial dada a sua eficiência. A interpolação bilinear usa uma grelha de pontos mais próximos 2 x 2 fechada na localização do ponto a interpolar e usa a média ponderada pela distância para chegar ao valor interpolado. Os pesos são em função do local interpolado a partir de cada um dos pontos da grelha. Supondo que se pretende encontrar o valor de uma função  $f$  no ponto  $(x,y)$ , e assumindo que se conhece o valor da função nos quatro pontos  $Q_{11} = (x_1,y_1)$ ,  $Q_{12} = (x_1,y_2)$ ,  $Q_{21} = (x_2,y_1)$  e  $Q_{22} = (x_2,y_2)$ , primeiro é necessário fazer a interpolação na direção  $x$ :

$$\begin{aligned} f(x, y_1) &= \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \\ f(x, y_2) &= \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}) \end{aligned} \quad (19)$$

De seguida procede-se à interpolação na direção  $y$  para estimar o valor do ponto:

$$f(x, y) = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} (f(Q_{11})(x_2 - x)(y_2 - y) + f(Q_{21})(x - x_1)(y_2 - y) + f(Q_{12})(x_2 - x)(y - y_1) + f(Q_{22})(x - x_1)(y - y_1)) \quad (20)$$

A resolução temporal do GNSS-PWV é de 5 min pelo que é necessária a interpolação linear no tempo (5 em 5 min) dos dados recebidos dos modelos, com saídas horarias.

## 3 Validação da pressão de temperatura

Com o objetivo de validar as pressões e temperaturas extraídas dos modelos usou-se as estações do IPMA equipadas com barómetro e termómetro numa resolução temporal de 10 min. 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. 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).

Com o objetivo de validar o modelo atmosférico ECMWF e AROME são utilizadas observações de 10 estações meteorológicas do IPMA (Tabela 2), para o mês de Abril e Maio de 2015, bem distribuídas espacialmente em Portugal Continental. De forma a comparar os dados observados com os modelados, foi efetuada a interpolação linear, de onde se obteve valores de pressão atmosférica e temperatura à superfície de ambos os modelos para cada 10 minutos.

O método de seleção utilizado para os pontos do modelo foi a interpolação bilinear de onde se extraíram os valores de pressão atmosférica e temperatura do modelo correspondentes à localização de cada estação do IPMA. Devido à diferença de altitudes entre a superfície virtual (modelo) e real (observações) do terreno, foi necessário efetuar as correções da temperatura e da

pressão modeladas para a altitude corresponde às estações meteorológicas. A pressão e temperatura foram corrigidas utilizando as equações (16) e (18), respetivamente. Foi também efetuada a comparação do método de interpolação bilinear com a seleção do ponto mais próximo de ambos os modelos, para as 10 estações do IPMA selecionadas.

Estações IPMA	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)
Bragança	41° 48'	6° 45'	690
V. Castelo	41° 39'	8° 48'	48
Vila real	41° 16'	7° 43'	1380
Viseu	40° 43'	7° 54'	636
Coimbra	40° 09'	8° 28'	170
C. Branco	39° 50'	7° 29'	597
Lisboa	38° 46'	9° 08'	104
Évora	38° 32'	7° 53'	246
Beja	38° 01'	7° 52'	561
Faro	37° 01'	7° 58'	8

Tabela 2 - Coordenadas geográficas das estações do IPMA

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

- *Root mean square error (RMSE)* ou a raiz do erro médio quadrático define-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre as previsões e as observações. Esta é muito sensível aos grandes erros e quanto mais próximo de 0 melhor são os resultados do modelo. Valores elevados de RMSE indicam que há grandes discrepâncias entre os valores previstos e os valores observados. Se o viés for baixo, o RMSE indica a dispersão dos resultados do modelo em relação às previsões.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o)^2} \quad (21)$$

- O índice *Mean absolute error (MAE)*, ou erro médio absoluto, é definido como a média das diferenças absolutas entre as previsões e as observações. Quanto menor o MAE, maior a semelhança entre as séries observadas e modeladas.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i^p - x_i^o| \quad (22)$$

- O índice *Viés* é definido como a média das diferenças entre as previsões do modelo e as observações. Averigua o enviesamento dos dados, ou seja, se for positivo indica que os valores simulados se encontram sobrestimados face aos observados e se for negativo encontram-se subestimados.

$$\text{Viés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o) \quad (23)$$

Onde  $N$  é o número total de observações da variável  $x$ . Os índices  $o$  e  $p$  representam a variável  $i$  observada e prevista pelo modelo, respetivamente.

- O *coeficiente de correlação de Pearson* identificado como  $r$  mede o grau de correlação linear entre os valores observados e os valores previstos. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1, sendo que  $r = 1$  significa uma correlação perfeita e positiva entre duas variáveis, e se  $r = -1$  significa uma correlação negativa e perfeita entre as duas variáveis.

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 3) e temperatura na (Tabela 4).

		Pressão			
		RMSE (hPa)	MAE (hPa)	BIAS (hPa)	r
Interpolação bilinear	AROME	0,93	0,84	-0,7	0,99
	ECMWF	1,09	0,88	-0,5	0,98
Ponto próximo	AROME	1,06	1,2	-0,58	1
	ECMWF	1,06	0,87	-0,55	0,98

*Tabela 3 – Estatísticas médias das estações IPMA estudadas para o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear no caso da pressão.*

Na comparação entre o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear, verifica-se que a correlação é praticamente perfeita. Apesar de o valor encontrado não ser o melhor, a variabilidade do campo da pressão não é significativa em 2.5 km de resolução o que explica o valor encontrado de correlação perfeita no caso do AROME para o ponto próximo. Verifica-se que para o caso do modelo AROME, o método de interpolação bilinear apresentou melhores resultados em todos os parâmetros estatísticos para a análise da temperatura, enquanto para a pressão os resultados são semelhantes 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 foi melhor.

		Temperatura			
		RMSE (K)	MAE (K)	BIAS (K)	r
Interpolação bilinear	AROME	1,52	1,13	0,31	0,96
	ECMWF	1,77	1,41	-0,46	0,94
Ponto próximo	AROME	1,54	1,18	0,32	0,96
	ECMWF	1,87	1,47	-0,54	0,94

*Tabela 4 - Estatísticas médias das estações IPMA estudadas para o método do ponto mais próximo e interpolação bilinear no caso da temperatura.*

Estes resultados para o modelo ECMWF podem ser explicados pela proximidade do ponto da grelha produzida pelo ECMWF estar próximo da estação do IPMA. Analisando apenas o método de interpolação bilinear para ambos os modelos, são apresentadas as tabelas de comparação entre as estações IPMA e o modelo AROME para a pressão (Tabela 5) e para a temperatura (Tabela 6) e modelo ECMWF para a pressão (Tabela 7) e temperatura (Tabela 8).

AROME	Pressão			
	RMSE (hPa)	MAE (hPa)	BIAS (hPa)	r
Bragança	1,14	1,041	-1,034	0,985
V. Castelo	1,46	1,359	-1,353	0,992
Vila real	0,467	0,36	0,091	0,9573
Viseu	0,741	0,639	-0,602	0,9915
Coimbra	1,301	1,2195	-1,219	0,984
C. Branco	0,542	0,437	0,3035	0,954
Lisboa	1,007	0,922	-0,9184	0,978
Évora	0,503	0,395	-0,264	0,986
Beja	1,098	1,0244	-1,023	0,9872
Faro	1,044	0,96	-0,954	0,986

Tabela 5 – Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo AROME aplicando a interpolação bilinear no caso da pressão.

AROME	Temperatura			
	RMSE (K)	MAE (K)	BIAS (K)	r
Bragança	1,38	1,0542	0,067	0,970
V. Castelo	1,952	1,074	0,966	0,920
Vila real	1,2352	0,9571	0,166	0,970
Viseu	1,63	1,2348	-0,0385	0,950
Coimbra	1,44	1,0712	-0,05	0,957
C. Branco	1,3783	1,0088	0,454	0,975
Lisboa	1,24377	0,9484	0,396	0,969
Évora	2,09	1,6516	1,301	0,968
Beja	1,4272	1,1198	0,23	0,970
Faro	1,468	1,1557	-0,404	0,953

Tabela 6 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo AROME aplicando a interpolação bilinear no caso da temperatura.

ECMWF	Pressão			
	RMSE (hPa)	MAE (hPa)	BIAS (hPa)	r
Bragança	1,21	0,992	-0,91	0,985
V. Castelo	0,822	0,664	-0,51	0,992
Vila real	1,562	1,209	0,445	0,9573
Viseu	0,74	0,602	0,498	0,9915
Coimbra	0,804	0,653	-0,146	0,984
C. Branco	1,848	1,46	-1,4	0,954
Lisboa	1,244	0,997	-0,923	0,978
Évora	0,87	0,712	-0,63	0,986
Beja	0,726	0,585	-0,47	0,9872
Faro	1,096	0,964	-0,95	0,986

Tabela 7 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo ECMWF aplicando a interpolação bilinear no caso da pressão.

ECMWF	Temperatura			r
	RMSE (K)	MAE (K)	BIAS (K)	
Bragança	1,592	1,314	-0,482	0,960
V. Castelo	1,793	1,4061	0,108	0,897
Vila real	1,611	1,302	-0,698	0,960
Viseu	1,737	1,3519	-0,476	0,945
Coimbra	1,698	1,3151	-0,199	0,937
C. Branco	1,828	1,454	-0,867	0,960
Lisboa	1,681	1,372	-0,949	0,956
Évora	2,113	1,7287	0,121	0,944
Beja	2,114	1,723	-0,486	0,945
Faro	1,575	1,1831	-0,636	0,923

Tabela 8 - Estatísticas das estações IPMA estudadas para o modelo ECMWF aplicando a interpolação bilinear no caso da temperatura.

Analisando apenas o método de interpolação bilinear, verifica-se para o caso da pressão, existem estações em que o modelo AROME apresenta melhores resultados e outras em que o ECMWF prevê melhor a pressão à superfície. 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 que ambos os modelos subavaliam a pressão atmosférica na maior parte das estações. Na previsão da temperatura, o modelo AROME apresenta resultados ligeiramente melhores de correlação. O valor médio de erro, considerando todas as estações, foi de 1,12 °C e 1,14 °C para o AROME e ECMWF respetivamente.

Concluindo, estes resultados mostram que ambos os modelos com previsões a menos de 1 dia, conseguem prever bem as variações de pressão à superfície e temperatura, dadas as altas correlações entre observações e previsões. 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 GNSS-PWV não estarão comprometidas, se se comparasse com valores de pressão e temperatura medidos *in situ*.

## 4 Validação do vapor de água precipitável

### 4.1 Dados utilizados na validação

#### 4.1.1. Radiossondas

A radiossonda é um instrumento meteorológico descartável, transportado por um balão em voo ascendente livre equipado com sensores de temperatura, humidade relativa que transmite via radio os dados com a terra, com resolução vertical ~10 m. As radiossondas também podem medir ou calcular a pressão, altitude, posição geográfica, vento e em alguns casos a concentração de ozono. Em Portugal uma radiossonda é lançada diariamente na estação Gago Coutinho (38° 46' N 9° 08' W). As variáveis usadas para o cálculo do PWV a partir das radiossondas é realizada através da humidade relativa, temperatura e pressão. Na Figura 4 encontram-se representados alguns dos dados recolhidos por uma radiossonda no dia 18 de julho de 2013: a

temperatura, a temperatura potencial, a humidade específica e a humidade relativa. Pode observar-se que o vapor de água se encontra maioritariamente concentrado na camada limite (cujo topo se encontra a cerca de 825 hPa).

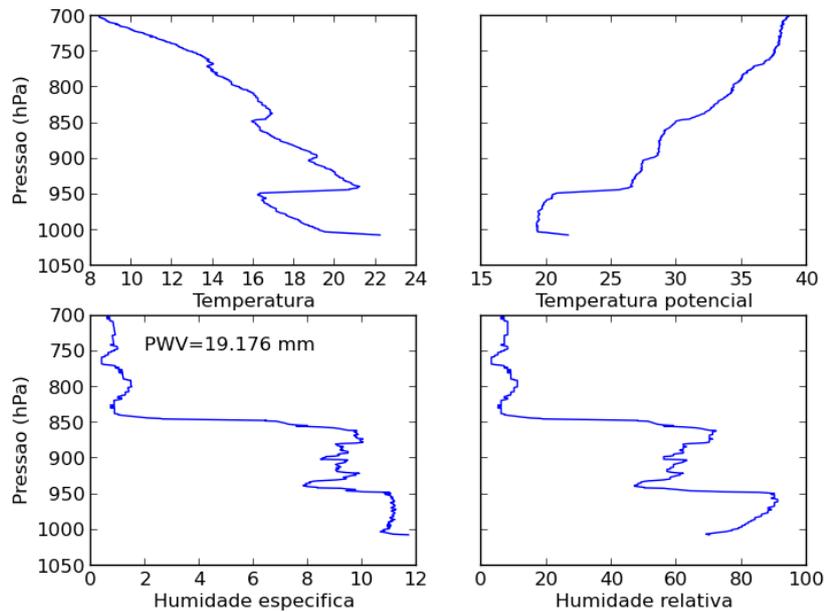


Figura 4 - Representação dos parâmetros das radiossondas medidos/calculados na vertical no dia 18 de julho de 2013 às 12h. A temperatura e temperatura potencial são representadas em °C a humidade específica em (g/kg) e a humidade relativa em %.

Para calcular o PWV a partir das radiossondas foi necessário transformar a humidade relativa em humidade específica. Para tal, seguiram-se os seguintes passos: 1) usou-se a equação (3) para determinar a pressão de saturação do vapor de água à respetiva temperatura e pressão; 2) a partir da humidade relativa, calcula-se a pressão parcial de vapor de água utilizando (4); 3) de seguida, calculou-se a razão de mistura usando (5); 4) humidade específica usando (6). O PWV é obtido pelo integral da humidade específica nos diferentes níveis de pressão de acordo com (7).

#### 4.1.1 Dados de perfiladores abordo de satélites

Neste estudo, usaram-se dados do Atmospheric Infrared Sounder [AIRS; Aumann et al. 2003], uma *suite* de instrumentos abordo do satélite *Aqua* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em órbita desde setembro de 2002. O *dataset* utilizado corresponde à versão 6 do produto AIRXSUP que combina informação de um sensor hiper-espectral (o sensor AIRS propriamente dito) que amostra cada pixel em mais de 2000 bandas no infravermelho e visível, com informação do sensor *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU) que providencia medições em 15 canais na banda do micro-ondas. Esta combinação de instrumentos permite medir perfis de temperatura, humidade e concentrações integradas de gases como o ozono, metano e monóxido de carbono, até em condições de céu parcialmente nublado (devido à utilização da informação na banda dos micro-ondas).

O produto tem uma resolução horizontal que de cerca de 45 km no nadir e uma resolução vertical variável que ronda os 25 hPa [Maddy and Barnett, 2008]. Os perfis de temperatura têm erros típicos de 1 K em cada camada de 1 km na troposfera e de 10% na humidade em camadas de 2 km na baixa troposfera. O satélite cruza o equador cerca das 13h30 locais na sua órbita ascendente e às 1h30 na órbita descendente. Neste trabalho, apenas foi utilizada a variável correspondente ao PWV (totH2OStd). O controlo de qualidade foi efetuado usando a *flag* totH2OStd\_QC: apenas foram utilizados perfis cuja *flag* não assumia o valor “2” – má qualidade. Na Figura 5 encontra-se representado um campo de PWV obtido pelo AIRS que cobre a região em estudo no dia 15 de abril de 2015. Os dados ilustram a grande variabilidade espacial que pode ser observada: valores

da ordem dos 25-30 mm foram registados na zona do mar de Alboran, enquanto valores rondando os 5 mm foram registados a noroeste das Ilhas Baleares. Nas comparações efetuadas foram construídas séries temporais a partir do ponto AIRS mais próximo da estação, caso esse se encontrasse a menos de 45 km das estações GNSS desprezando os valores no oceano.

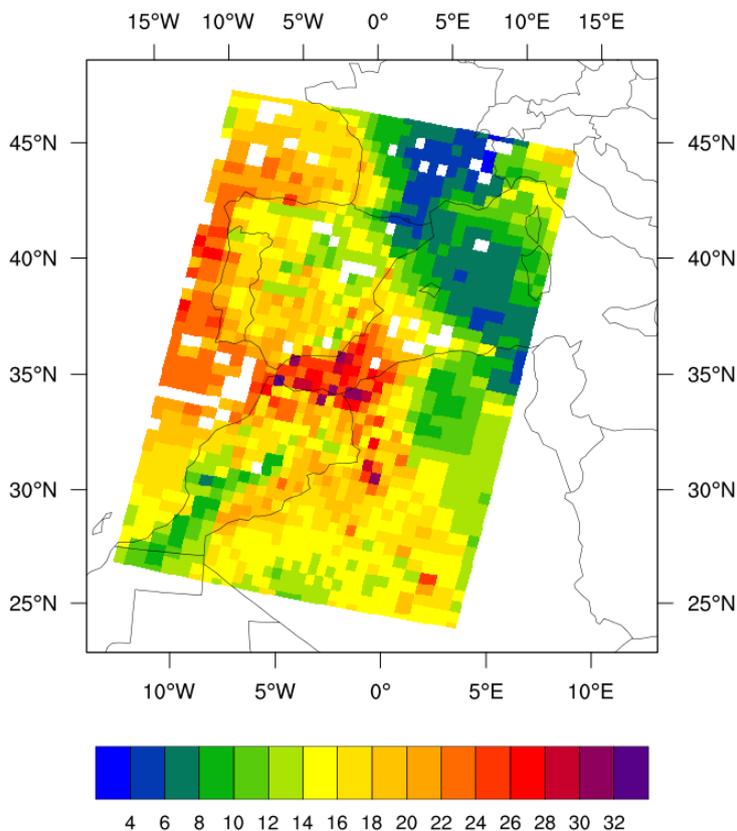


Figura 5 - PWV (mm) para o dia 15 de abril de 2015 13UTC (dados AIRS)

#### 4.1.2 Previsões operacionais do ECMWF

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico obtido através da previsão de PWV do ECMWF para o dia 15 de abril de 2015 para as 13UTC (run das 0h do mesmo dia), em que se registaram inundações em Lisboa e Coimbra.

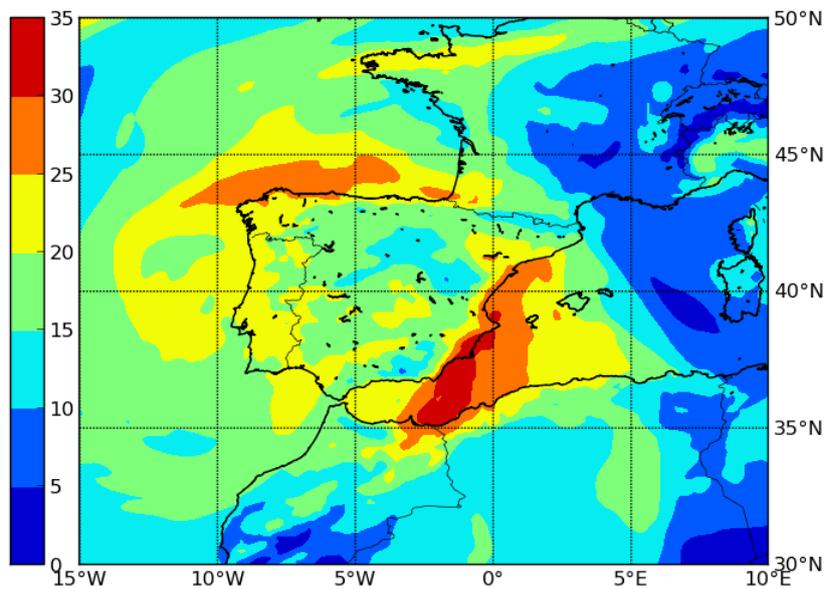


Figura 6 - PWV (mm) para o dia 15 de abril de 2015 13 UTC (previsão operacional ECMWF)

A análise operacional do ECMWF que constitui as condições iniciais do modelo de previsão numérica, é considerada uma das melhores análises atmosféricas existentes, pela grande qualidade do seu esquema de assimilação [Anderson e Thépaut, 2008]. Usa dados vindos de satélites, radiossondas e outras observações, nomeadamente do AIRS, o que explica a semelhança entre as Figuras 5 e 6. As previsões a curto prazo refletem essa qualidade: observa-se pela figura que a previsão do ECMWF representa com grande detalhe as grandes heterogeneidades espaciais de vapor de água e a intrusão de ar húmido que se verificou na Península Ibérica nesta ocasião. Nas comparações futuras pretende-se usar na validação da serie temporal mais longa, assim que os dados estejam disponíveis, as análises operacionais do ECMWF produzidas às 00, 06, 12 e 18 UTC com melhor qualidade.

## 4.2 Resultados

Nestes resultados preliminares onde se comparam os dados recebidos do PWV obtido através do sistema GNSS, do AIRS, da análise do ECMWF e os dados registados pelas radiossondas, foram encontrados dados animadores nesta fase inicial. No âmbito deste relatório, os dados do PWV referem-se apenas a Lisboa, em abril de 2015, mas serão extendidos a uma série temporal mais longa compreende o período 2012-presente, assim que a produção dos dados esteja finalizada. As radiossondas são lançadas na estação Gago Coutinho e o recetor GNSS mais próximo com dados disponíveis, encontra-se no Instituto Geográfico Português, aproximadamente a 5km.

O número de valores de GNSS-PWV é de 7512, as radiossondas têm 23 dados e do AIRS dispõe-se de 62 valores. Na Figura 7 apresenta-se o gráfico de comparação entre os vários métodos de estimativa/medição de vapor de água. Convém notar que as análises que constituem as condições iniciais dos modelos globais usam as radiossondas lançadas em Lisboa como *input*. É por isso esperado que a estimativa de PWV do ECMWF seja muito semelhante com o PWV das radiossondas nas horas onde elas são lançadas. De notar também que as estimativas obtidas com satélite também não estão isentas de incerteza, sendo a incerteza do produto PWV do AIRS bastante difícil de quantificar. No entanto a correlação aparente entre as diferentes fontes de dados é notável.

A Tabela 9 apresenta um sumário das estatísticas de erro, onde são comparados os resultados obtidos usando AROME e ECMWF como input de P e T.

Entrada P e T	Fontes de PWV	RMSE (mm)	BIAS (mm)	MAE (mm)	r
	ECMWF	2.61	-1.95	2.21	0.92
ECMWF	Radiossondas	1.79	-1.53	1.53	0.98
	AIRS	2.97	-1.03	2.27	0.75
	ECMWF	3.14	-2.60	2.74	0.92
AROME	Radiossondas	2.72	-2.58	2.58	0.99
	AIRS	3.44	-1.86	2.66	0.74

Tabela 9 – Resultados estatísticos da comparação de PWV do ECMWF, Radiossondas e AIRS com os dados GNSS-PWV para Abril de 2015. No cálculo dos parâmetros estatísticos foram calculadas as diferenças  $PWV_{fonte} - PWV_{GNSS}$ .

No geral, os dados obtidos através de GNSS mostram uma sobreavaliação do PWV em comparação com os dados disponíveis. O viés negativo é explicado por considerar-se como validas as fontes de PWV (i.e. as comparações dos dados de PWV do ECMWF, radiossondas e AIRS com GNSS).

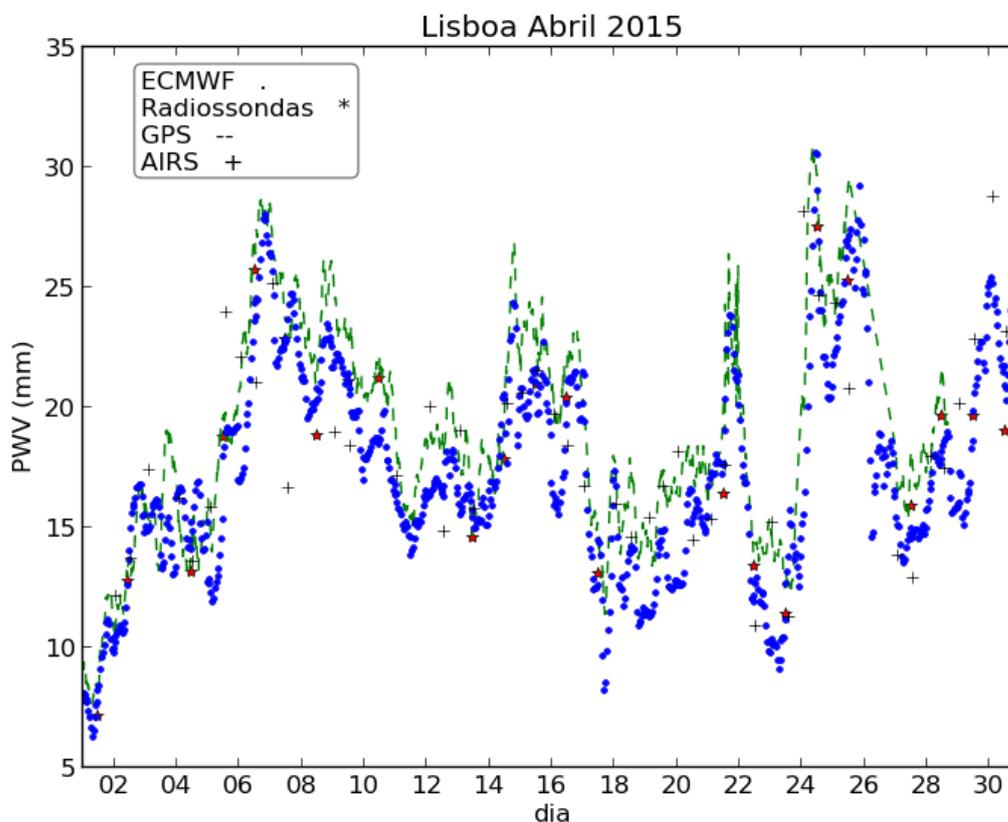


Figura 7 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, radiossondas, AIRS e estimativas de 5 min GNSS-PWV para o mês de Abril de 2015 com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF.

Os dados estatísticos da Tabela 9 mostram que para a estação de Lisboa, o modelo ECMWF fornece dados de pressão e temperatura melhores que os dados fornecidos pelo AROME. Verifica-se que comparando os dados de GNSS e de radiossondas, os dados de GNSS são sempre superiores ( $MAE \sim |BIAS|$ ). A entrada de dados de pressão e temperatura do modelo AROME também mostra sinais de sobreavaliação em relação aos dados extraídos do ECMWF. O erro calculado encontra-se entre 1-3 mm para ambos os modelos e a correlação esta perto da perfeição o que mostra que os dados de GNSS são de valor acrescentado pela sua grande resolução temporal.

No dia 15 de abril de 2015 o IPMA colocou 18 distritos sob aviso amarelo devido a chuvas fortes. Registaram-se inundações em Coimbra e Lisboa. Os dados mostram que houve um pico de vapor de água integrado sentido pelo GNSS no dia anterior ao evento, seguido de grandes oscilações em torno ao dia do evento e de uma grande discrepância dos resultados nesse período. Uma razão coerente desse facto é a liquidação do vapor de água em forma de nuvem nos momentos prévios as chuvas intensas registadas. Em trabalhos futuros pretende-se quantificar os acréscimos e decréscimos de PWV em relação à quantidade de precipitação medida. A diferença de pressão ao meio dia do dia 15 de abril de 2015 é de 1.4 hPa ( $P_{AROME} < P_{ECMWF}$ ) e a diferença de temperatura é de 4.2°C ( $T_{AROME} > T_{ECMWF}$ ), que corresponde a uma diferença de PWV entre GNSS e radiossondas de 1.59 mm ( $PWV_{AROME} > PWV_{ECMWF}$ ). A variação de pressão sendo tipicamente de 1 hPa entre o ECMWF e a sentida *insitu* não compromete o erro do PWV. No entanto o erro da temperatura pode variar mais bruscamente e induzir erros maiores.

Com o objetivo de selecionar que modelo de pressão e de temperatura será usado operacionalmente, compararam-se também com as restantes estações (Tabela 1). Neste as estimativas de GNSS-PWV são comparadas com a análise operacional do ECMWF e com o sensor AIRS. Realizou-se o mesmo procedimento com a entrada de pressão e temperatura do ECMWF (Tabela 10 - Dados estatísticos da comparação dados de PWV do ECMWF e AIRS com o GNSS-PWV para as estações em estudo com input de pressão e temperatura do ECMWF.) AROME (Tabela 11) para o mesmo mês de Abril de 2015.

Estações GPS	Fontes PWV	RMSE (mm)	BIAS (mm)	MAE (mm)	r
BRGN	ECMWF	2,85	-2,46	2,55	0,92
	AIRS	3,12	-2,45	2,65	0,82
CBRA	ECMWF	2,25	-1,52	1,8	0,93
	AIRS	2,86	-1,39	2,01	0,81
PCOU	ECMWF	2,36	-1,83	2,01	0,94
	AIRS	2,89	-1,23	2,27	0,79
FCOA	ECMWF	2,77	-2,32	2,43	0,92
	AIRS	4,16	-3,32	3,36	0,75
AGUE	ECMWF	3,08	-2,57	2,67	0,94
	AIRS	4,11	-2,65	3,25	0,78
FAJA	ECMWF	1,97	-1,28	1,56	0,93
	AIRS	2,55	-0,74	1,99	0,8
PORT	ECMWF	2,37	-1,63	1,92	0,92
	AIRS	2,3	-0,62	1,74	0,83
BEJA	ECMWF	2,79	-2,03	2,23	0,9
	AIRS	2,61	-1,85	2,13	0,9
LAGO	ECMWF	3,09	-2,45	2,59	0,92
	AIRS	2,45	-1,27	1,81	0,91

*Tabela 10 - Dados estatísticos da comparação dados de PWV do ECMWF e AIRS com o GNSS-PWV para as estações em estudo com input de pressão e temperatura do ECMWF.*

Estações GNSS	Fontes PWV	RMSE (mm)	BIAS (mm)	MAE (mm)	r
BRGN	ECMWF	3,72	-3,45	3,48	0,93
	AIRS	4,03	-3,58	3,58	0,84
CBRA	ECMWF	2,5	-1,86	2,03	0,93
	AIRS	3	-1,83	2,21	0,83
PCOU	ECMWF	--	--	--	--
	AIRS	--	--	--	--
FCOA	ECMWF	3,52	-3,19	3,24	0,93
	AIRS	5,07	-4,35	4,35	0,74
AGUE	ECMWF	3,13	-2,65	2,73	0,94
	AIRS	4,16	-2,8	3,3	0,79
FAJA	ECMWF	2,25	-1,66	1,84	0,92
	AIRS	2,69	-1,22	2,17	0,8
PORT	ECMWF	3,26	-2,76	2,83	0,92
	AIRS	2,97	-1,9	2,2	0,81
BEJA	ECMWF	3,18	-2,54	2,63	0,89
	AIRS	3,25	-2,61	2,73	0,89
LAGO	ECMWF	3,71	-3,21	3,27	0,93
	AIRS	3,04	-2,13	2,34	0,91

*Tabela 11 – Dados estatísticos da comparação dados de PWV do ECMWF e AIRS com o GNSS-PWV para as estações em estudo com input de pressão e temperatura do AROME.*

Os resultados obtidos mostram uma boa correlação dos dados de GNSS com a previsão do ECMWF e na maioria das estações também com a medição do AIRS. Ainda em fase de operacionalização do sistema, estes valores de correlação poderão permitir que os produtos de GNSS-PWV sejam corrigidos do viés a fim de diminuir o erro. O facto de o viés e o MAE na maior parte dos casos serem muito similares denota a sobreavaliação do sistema de GNSS. O RMSE varia entre 2 e 3 mm quando comparado com a previsão do ECMWF, e varia entre 2 e 4 mm para a estimativa de AIRS para a pressão e temperatura fornecida pelo ECMWF e varia entre 2 e 4 mm e entre 3 e 4 mm quando comparado com a previsão do ECMWF e estimativa

AIRS respetivamente. A pior estação encontra-se em Lagos (estação perto da linha de costa). Neste caso as estimativas de pressão e temperatura interpoladas bilinearmente têm pontos no oceano que pode explicar o maior erro. Os melhores resultados encontram-se para Fajão no conselho de Coimbra. Estes resultados mostram também uma melhor estimativa de PWV em maior altitude apesar de não serem resultados conclusivos. O AIRS por ter uma resolução de 45 km pode estimar valores muito diferentes da realidade que podem explicar os erros elevados encontrados para o AIRS. No caso da estimativa de vapor de água a partir de previsões de pressão e temperatura provenientes do modelo AROME, verifica-se do mesmo modo a sobreavaliação das estimativas GNSS-PWV. Verifica-se que com as estimativas de pressão e temperatura obtidas a partir do modelo AROME, se obtêm piores resultados quando comparando com as estimativas provenientes do modelo ECMWF, analisando os parâmetros MAE, RMSE e BIAS. No caso da análise de correlação não se verificam diferenças significativas comparando as duas metodologias. Pela comparação do MAE e BIAS, verifica-se que o erro é normalmente da mesma magnitude, o que permite efetuar uma correção de viés dos produtos de GNSS-PWV.

Apresenta-se na (Figura 8) e na (Figura 9) as series temporais para as estações descritas na (Tabela 1) com o input da pressão e temperatura do ECMWF e AROME respetivamente. Comparam-se os dados de PWV obtido da previsão do ECMWF, as medições realizadas pelo sensor AIRS e as estimativas 5-min GNSS-PWV. Neste caso foram divididas as representações pelos dois modelos. Com o *input* da pressão e temperatura do ECMWF representou-se as estações de Águeda, Beja, Vila Nova de Foz Coa e Lagos. Com o *input* de pressão e temperatura do AROME representou-se as estações de Fajão, Bragança, Castelo Branco e Portalegre.

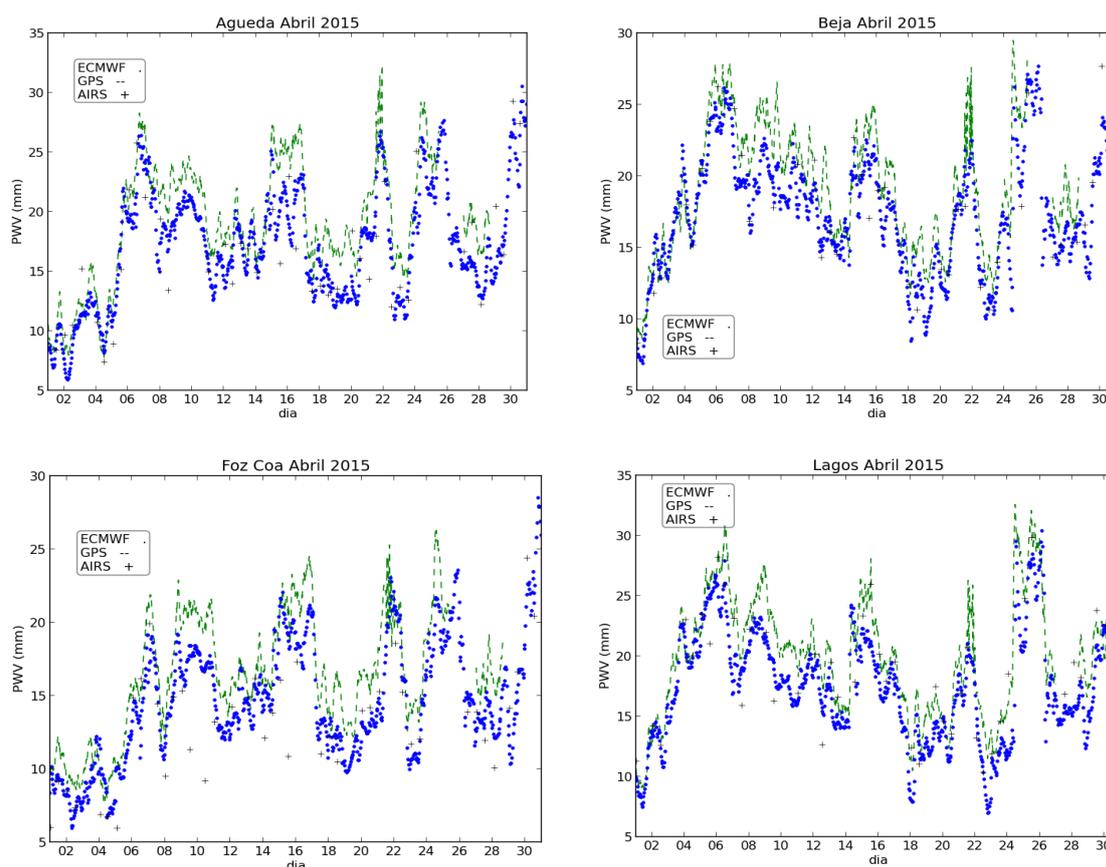


Figura 8 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, AIRS e estimativas de 5 min GNSS-PWV para o mês de Abril de 2015 para as estações em estudo com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF.

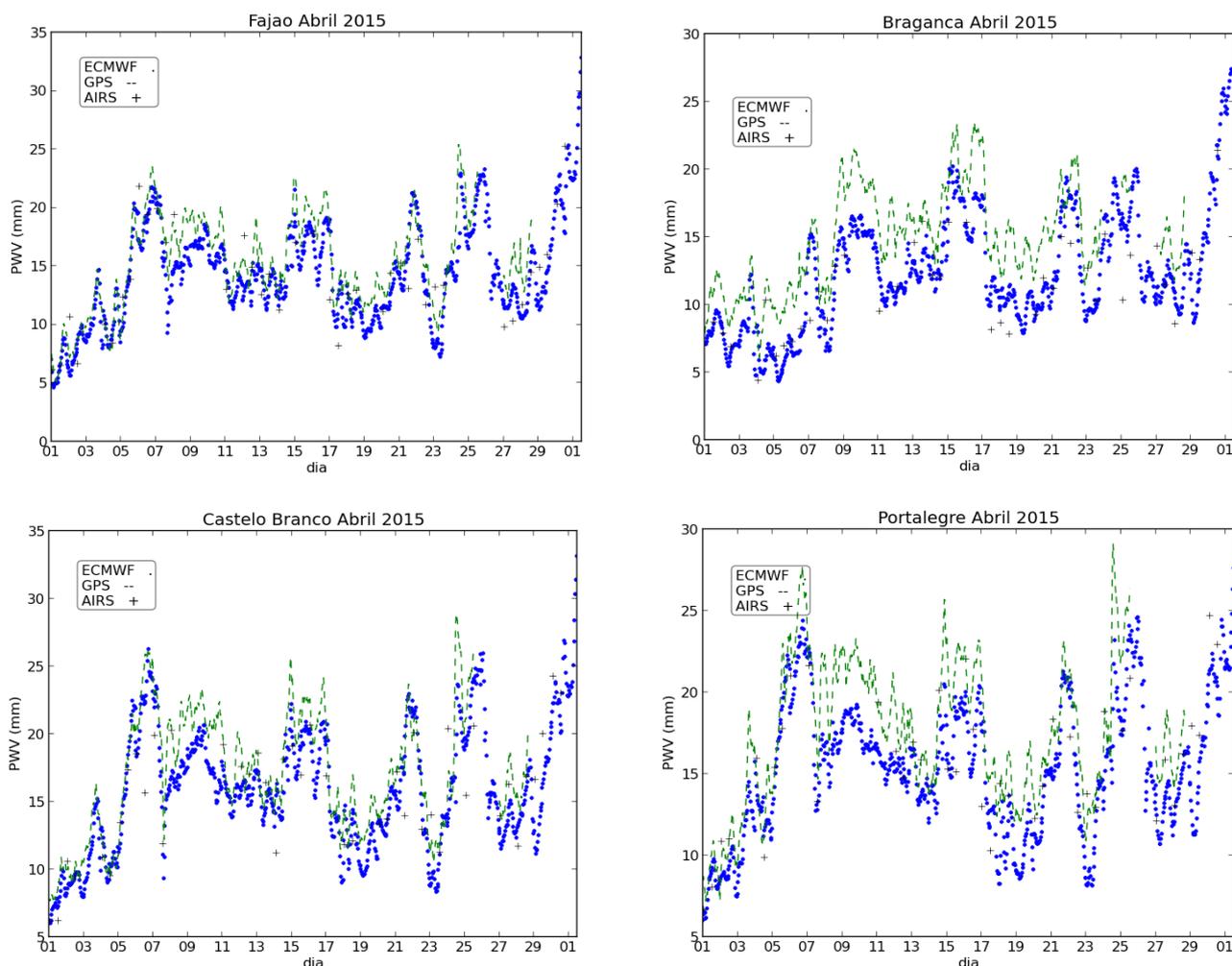


Figura 9 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, AIRS e estimativas 5-min GPS para o mês de Abril de 2015 com a entrada de dados de pressão e temperatura do AROME.

## 5 Conclusão e trabalho futuro

Dos principais objetivos traçados pelo projeto, o primeiro foi realizado encontrando o modelo escolhido para o envio da pressão e temperatura para a UBI. O ECMWF traz uma série de vantagens como a fiabilidade. Além disso, validaram-se os dados de pressão e temperatura calculados com medições *in situ* das estações do IPMA. O segundo objetivo principal também foi alcançado, tendo sido operacionalizado o sistema de envio da pressão e temperatura para a UBI assim que os campos do ECMWF e do AROME são recebidos. Nesta fase, a UBI está a finalizar a operacionalização do sistema, a fim de obter um produto de PWV no centro de operações do IPMA e conseguindo trazer valor acrescentado a previsões a muito curto prazo de precipitações intensas.

Verifica-se pelos resultados analisados, que as estimativas de PWV provenientes do modelo ECMWF são melhores que as do modelo AROME, devendo ser o modelo ECMWF o escolhido para a implementação final do produto. Analisando a comparação da pressão e temperatura com as estações do IPMA onde o modelo AROME representa melhor a temperatura e o ECMWF a pressão, podemos também ser levados a concluir que a influência da pressão à superfície nas estimativas GNSS-PWV é superior à influência da temperatura.

Como trabalho futuro, pretende-se ainda analisar uma base de dados maior (~3/4 anos) e para todas as estações de forma a ter maior robustez nas estatísticas e fornecer uma estimativa de erro para fins operacionais. Estes resultados iniciais permitem já

algum otimismo em relação à obtenção de um produto de boa qualidade, com grande resolução espacial e temporal do vapor de água integrado no IPMA através do sistema GNSS. Do mesmo modo, pretende-se alargar o estudo de validação ao nível sub-diário usando radiossondas lançadas em campanhas específicas, nomeadamente no âmbito de projetos de investigação realizados pela Universidade de Évora na barragem do Alqueva e uma outra no âmbito do projeto SMOG, coordenado pelo Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pelo IPMA e pelo SEGAL, em que o lançamento de 4 em 4 horas das radiossondas foi realizada durante 4 dias.

Na análise estatística de validação do produto obtido, verificaram-se elevados valores de correlação entre o GNSS-PWV e alguma das fontes desta variável atualmente utilizadas, concluindo-se que as variações temporais do PWV serão bem estimadas através do sistema GNSS, tratando-se de uma mais-valia na previsão nowcasting de fenómenos de precipitação extrema, difíceis de prever pelos modelos numéricos. Na maioria dos casos temos uma sobreavaliação em grandeza das estimativas GNSS-PWV, sendo que ( $|BIAS| \approx MAE$ ) espera-se que uns resultados mais robusta nos traga a certeza de um possível enviesamento das estimativas GNSS-PWV a fim de diminuir o erro. Conclui-se também que apesar do AROME apresentar uma maior resolução espacial, os resultados nem sempre foram melhores, quando comparados com o modelo ECMWF, nomeadamente na previsão da pressão à superfície. Uma das razões que se pensa explicar esta diferença de performance é o elevado número de níveis verticais do ECMWF (137 níveis) em relação ao AROME (46 níveis) bem como o papel fundamental desempenhado pelo sistema de assimilação de dados do ECMWF.

Em geral, espera-se ainda que as medições obtidas com este sistema tragam uma mais-valia quando existirem fortes heterogeneidades no campo de vapor de água. São disso exemplos situações de ciclogénese explosiva (com intrusão de ar estratosférico no seio de um ciclone extratropical) e os chamados rios atmosféricos, situações em que uma faixa de ar tropical muito húmida é advectada sobre uma região subtropical provocando chuva intensa e persistente. Essas situações serão analisadas até ao término do projeto. Pretende-se fazer uma análise exaustiva de eventos com elevada precipitação nos últimos anos, nomeadamente os eventos Sting jet do nordeste de 23 de dezembro de 2009 e Xynthia a fevereiro de 2010. Dado o acesso privilegiado aos dados de precipitação dos radares meteorológicos em Portugal, pretende-se estudar também a relação entre a precipitação e vapor de água medido pelo sistema, esperando obter-se correlações significativas entre precipitação e valores GNSS. Pretende-se ainda analisar os índices de instabilidade existentes, comparando-os com a variabilidade observada no GNSS-PWV.

## Bibliografia:

American Meteorological Society, cited 2014: Precipitable water vapor. *Glossary of Meteorology*. [Available online at [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable\\_water\\_vapor](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable_water_vapor)]

American Meteorological Society, cited 2014: Water vapor. *Glossary of Meteorology*. [Available online at [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Water\\_vapor](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Water_vapor)]

**Andersson, E. J-N Thépaut**, 2008: ECMWF's 4D-Var data assimilation system –the genesis and ten years in operations, *ECMWF Newsletter* 115, 8-12

**Arden L. Buck**. 1981. New Equations for computing vapour pressure and enhancement factor. *National Centre for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307*

**Aumann, H. H., and Coauthors**, 2003: AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 253-264.

**Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware**. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 15,787-15,801.

**Brunner FK, Gu M**. 1991. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. *Manuscr. Geodaet.* 16: 205-214.

**Champollion C, Masson F, Van Baelen J, Walpersdorf A, Chéry J, Doerflinger E**. 2004. GPS monitoring of the tropospheric water vapor distribution and variation during the 9 September 2002 torrential precipitation episode in the Cévennes (southern France). *J. Geophys. Res.* 109: D24102.

**De Haan S**. 2006. National/Regional Operational Procedures of GPS Water Vapor Networks and Agreed International Procedures. *Instruments and Observing Methods, Report No. 92. World Meteorological Organization: Geneva.*

**Duan J, Bevis M, Fang P, Bock Y, Chiswell S, Businger S, Rocken C, Solheim F, van Hove T, Ware R, McClusky S, Herring TA, King RW**. 1996. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J. Appl. Meteorol.* 35.: 830-838.

**Elliot, W. P. and D. J. Gaffen**. 1991. On the utility of rawinsonde humidity archived for climate studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 72(10):1507-1520.

**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.

**Holton, James R., and Gregory J. Hakim**. 2012. An introduction to dynamic meteorology. *Vol. 88. Academic press.*

**Jin SG, Luo O.F**. 2009. Variability and climatology of PWV from global 13-year GPS observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47(7): 1918-1924.

**Maddy, E. S., and C. D. Barnett**, 2008: Vertical resolution estimates in version 5 of AIRS operational retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**, 2375-2384.

**Marcus S**. 2007. Influence of GPS precipitable water vapor retrievals on quantitative precipitation forecasting in southern California. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 46: 1828-1839.

- Murry L. Salby.** 1996: *Fundamentals of atmospheric physics*. Vol. 61. Academic press, 1996.
- Nilson T, Elgered G.** 2008. Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data. *J. Geophys. Res.* 113:D19101.
- 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.
- Saastamoinen J.** 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S.W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, pp. 247-251, AGU, Washington, D. C., DOI:10.1029/GM015p0247*
- Seco A, González P, Ramírez F, García R, Prieto E, Yagié C, G Fernández J.** 2009. GPS monitoring of the tropical storm Delta along the Canary Island track, November 28-29, 2005. *Pure Appl. Geophys.* 166: 1519-1531.
- Tralli DM, Lichten SM.** 1990. Stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements. *Bull. Geod.* 64: 127-159.
- Wang J, Zhang L, Dai A, Van Hove T, Van Baelen J.** 2007. A near-global, 2 hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *J. Geophys. Res.* 1122: D11107.
- Yuan, L. Y., R. A. Anthes, R. H. Ware, C. Rocken, W. D. Bonner, M. G. Bevis, and S. Businger.** 1993. Sensing climate change using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 98, 14,925-14,937.