

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Sinergia entre o Radar Meteorológico e o GPS na previsão do tempo a curto prazo**

Paulo Nuno Barcelos Narciso

**Mestrado em Ciências Geofísicas**  
Especialização em Meteorologia e Oceanografia

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor Pedro Manuel Alberto de Miranda

2022

## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Pedro Miranda, um agradecimento muito especial por ter aceitado orientar esta dissertação, e permitir que concluísse com sucesso esta etapa académica. Obrigado por tudo.

Ao Doutor Pedro Viterbo um muito obrigado. Desejo-lhe tudo de bom.

Ao Doutor Pedro Benevides e Doutor Pedro Mateus pelo fornecimento dos dados de GPS e pós-processamento.

Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera, instituição que tenho todo prazer em pertencer e trabalhar, pela cedência de informação e dados meteorológicos.

À Anabela e ao Duarte.

*“In time and with water, everything changes.”*

Leonardo da Vinci

## **Resumo**

A presente tese de mestrado consiste no estudo da potencial utilização conjunta de informação proveniente de redes de sistemas de navegação por satélite (GNSS), em particular do GPS, e de radar meteorológico com vista a uma futura integração para melhoria da previsão a curto prazo.

A boa relação entre o vapor de água precipitável (PWV), calculado a partir do atraso troposférico sofrido pelo sinal das redes de GNSS, e as radiossondagens é analisado. É ainda verificado nos valores máximos de PWV e no ramo descendente a ocorrência de episódios de precipitação com base em estações meteorológicas automáticas e no campo da precipitação estimado pelo radar meteorológico.

Foi ainda estudada a relação entre valores de PWV e valores de máximos de refletividade obtidos pelo radar.

**Palavras-chave:** Radar Meteorológico, GPS, Vapor de Água, PWV, *Nowcasting*

## **Abstract**

The present master's thesis consists of the study of the potential joint use of information from Global Navigation Satellite Systems (GNSS) networks, particularly GPS, and weather radar with an aim to a future integration to improve short-term forecasting.

The good relationship between precipitable water vapour (PWV), calculated from the tropospheric delay suffered by the signal of GNSS networks, and soundings is analyzed. It is also verified the occurrence of precipitation episodes based on automatic weather stations and the precipitation field estimated by weather radar in the maximum values and in the descending branch of PWV.

The relationship between PWV values and maximum reflectivity values obtained by radar was also studied.

**Keywords:** Weather Radar, GPS, Water Vapour, PWV, *Nowcasting*

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>ii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introdução e Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Precipitação de origem convectiva.....	2
1.4 Estrutura da Tese.....	4
<b>2. Vapor de água na atmosfera</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Sensores GPS</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Radar Meteorológico</b> .....	<b>9</b>
4.1 Equação Radar .....	10
4.1.1 Equação radar para um alvo pontual.....	10
4.1.2 Equação radar generalizada .....	11
4.2 Relação entre o conteúdo em água líquida, a taxa de precipitação e o parâmetro Z.....	13
4.3 <i>Doppler</i> e momento velocidade .....	14
<b>5. Área de estudo</b> .....	<b>15</b>
5.1 Contaminação da informação radar .....	15
<b>6. Sensores e estações – características e dados</b> .....	<b>20</b>
6.1 Estações meteorológicas automáticas .....	21
6.1.1 Radiossondagem .....	22
6.2 GPS .....	22
6.3 Radar .....	25
<b>7. Análise de dados</b> .....	<b>27</b>
7.1 Dados radar – precipitação.....	27
7.2 Dados GPS .....	30
7.2.1 Comparação GPS – Radiossondagens .....	31
7.3 Dados das Estações de Superfície.....	34
7.3.1 Comparação EMAs – GPS.....	35
7.3.2 Comparação EMAs – Radar .....	37

7.4 Comparação Radar – GPS.....	39
7.5 Comparação Radar/GPS – estudo de casos.....	44
7.5.1 Estudo de caso – Outubro de 2012.....	44
7.5.2 Estudo de caso – 14 a 16 de janeiro.....	47
7.5.3 Estudo de caso – 15 de março.....	49
7.5.4 Estudo de caso – 14 a 15 de agosto.....	51
7.5.5 Estudo de caso – 23 a 25 de agosto.....	53
<b>8. Conclusões e Trabalho futuro .....</b>	<b>55</b>
<b>9. Referências .....</b>	<b>57</b>
<b>10. Anexos.....</b>	<b>61</b>
10.1 Anexo I – Valores filtrados do produto RAIN1 do radar de CCL .....	61
10.2 Anexo II – Variação mensal dos valores máximos de RAIN1 para o ano de 2012 .....	61
10.3 Anexo III – Variação mensal de PWV de todas as estações GPS para o ano de 2012 .....	63
10.4 Anexo IV – Variação mensal de PWV das 5 estações GPS (IGP0, CASC, FCUL, IGEO, PCAR) no ano de 2012 .....	64
10.5 Anexo V – Comparação dos valores mensais de precipitação horária registada nas estações de superfície e a estimada pelo radar meteorológico. ....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 6.1 – Lista das EMAs (I e II) e RUEMAs. ....	22
Tabela 6.2 – Lista dos recetores GPS.....	23
Tabela 6.3 – Características gerais do radar de CCL. ....	25
Tabela 6.4 – Estratégia operacional do radar de CCL.....	26
Tabela 7.1 – Número de dados radar do produto RAIN1 em função dos <i>raw data</i> .....	28
Tabela 7.2 – Altitudes (em km) a que é realizada a observação, em função do ângulo de elevação, sobre cada um dos vértices/pontos (Pn) que delimitam a área de estudo.....	43

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Carta de prognóstico de superfície para as 12 UTC, de dia 1 de abril de 2019 (IPMA) (esquerda) e de dia 25 de outubro de 2016 (direita) (ECMWF) (pressão a nível do mar (linhas a preto, 4 em 4 hPa) e vento a 10 m (barbelas, kt)).....	3
Figura 1.2 – Produto PCAPPI de R (em $\text{mmh}^{-1}$ ), da elevação mais baixa ( $0,1^\circ$ ), para os instantes 1130, 1145, 1200, 1215, 1230 e 1255 UTC, de dia 1 de abril de 2019, do radar de CCL. ....	3
Figura 1.3 – Produto PCAPPI de R (em $\text{mmh}^{-1}$ ), da elevação mais baixa ( $0,1^\circ$ ), para os instantes 1525, 1530, 1535, 1540, 1545 e 1550 UTC, de dia 25 de outubro de 2016, do radar de CCL. ....	4
Figura 3.1 – Evolução do número de estações de superfície GNSS a fornecer informação ZTD para fins operacionais de modelos de previsão numérica no âmbito do programa <i>EIG EUMETNET GPS Water Vapour Programme</i> (adaptado de (Guerova, et al. 2016)). ....	6
Figura 3.2 – Ilustração dos vários sistemas de navegação por satélite.....	6
Figura 3.3 – Trajetos do sinal proveniente da rede de satélites do sistema de navegação, na qual se identificam os trajetos do <i>Slant Total Delay</i> (STD) (segmentos de reta a azul) e o <i>Zenith Total Delay</i> (ZTD) (segmento de reta a vermelho) obtidos no recetor GPS (adaptado de (Kazuaki Imaoka 2019)). ....	7
Figura 3.4 – Esquema do trajeto percorrido pelo sinal GPS entre o satélite e a estação à superfície, na qual se destaca a passagem pela ionosfera e pela troposfera.....	8
Figura 4.1 – Rede nacional de radares meteorológicos do IPMA. Os radares de polarização dupla (APG, PPE e TSB) estão identificados a verde, os radares de polarização simples (CCL e LCC) estão identificados a azul e os futuros radares da Região Autónoma dos Açores (FMA e SPS) estão identificados a castanho claro. Todos os círculos centrados nos radares têm um alcance de 300 km. ....	10
Figura 5.1 – Área de estudo em destaque e identificação do radar meteorológico de CCL, das estações GPS e das estações meteorológicas automáticas. O modelo digital do terreno foi baseado em ((CGIAR-CSI) 2004-2022). ....	15
Figura 5.2 – Cobertura do radar de CCL considerando um rastreio com um ângulo mínimo de $0,1^\circ$ e máximo de $2,9^\circ$ , com a área em estudo delimitada pelo retângulo a preto (software <i>Cambridge Pixel</i> , 2022). ....	16
Figura 5.3 – (a) Mapa com identificação geográfica dos parques eólicos, das estações de GPS e do radar meteorológico de CCL, e (b) Produto de precipitação acumulada em 6h, das 23 UTC de dia 29 de agosto de 2022, do radar de CCL. ....	17
Figura 5.4 – Propagação do feixe radar sob condições de a) refração normal, b) subrefração, c) superrefração e d) duto (adaptado de <i>National Weather Service</i> , NOAA, 2022). ....	18
Figura 5.5 – (a) Produto MAX(Z) das 1720 UTC do radar de APG e (b) produto MAX(Z) das 2140 UTC do radar de CCL, ambos de dia 20 de julho de 2022. ....	18

Figura 5.6 – Carta de prognóstico de superfície para as 12 UTC de dia 1 de junho de 2022 (IPMA). .....	19
Figura 5.7 – (a) Imagem do produto PPI, das 1150 UTC de 1 de junho de 2022, da refletividade total e (b) da refletividade corrigida, da elevação 0,1° do radar de CCL. A área de estudo está delimitada por um retângulo a azul e a localização do radar pela etiqueta ‘lisboa_radar’.....	19
Figura 5.8 – Menu de configuração da qualidade dos dados para o sub-rastreamento da refletividade, a que correspondem as primeiras 4 elevações, do radar de CCL.....	20
Figura 6.1 – Mapa com a identificação das estações automáticas distinguidas pelo seu tipo, estações GPS, estação de radiossondagem, área de estudo e cobertura radar (r = 150 km) (Modelo Digital do Terreno, <a href="https://srtm.csi.cgiar.org/">https://srtm.csi.cgiar.org/</a> ).....	21
Figura 6.2 – Fluxograma para o cálculo do PWV.....	24
Figura 6.3 – Diagrama esquemático dos fatores que afetam a quantidade de vapor de água na atmosfera (adaptado de (Li 2018))......	24
Figura 6.4 – Fotografias dos sensores (a) IGP0 e (b) CASC (dgT, Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS 2022)......	25
Figura 6.5 – Imagem da Estação Radar de CCL. ....	25
Figura 7.1 – Desvios do total de precipitação mensal em 2012 em relação ao valor normal 1971-2000 em Portugal Continental (adaptado de (IPMA 2012)). ....	27
Figura 7.2 – Produto RAIN1, (a) das 07 UTC de dia 14 de maio de 2012 e (b) das 06 UTC de dia 16 de julho de 2012, do radar de CCL, com a área em análise delimitada pelo retângulo azul.....	28
Figura 7.3 – Valor máximo do produto RAIN1 no ano de 2012.....	29
Figura 7.4 – Valor máximo do produto RAIN1 para novembro de 2012. ....	29
Figura 7.5 – PWV de todas as estações GPS em 2012.....	30
Figura 7.6 – Valores de PWV dos cinco sensores GPS, em destaque na Tabela 6.2, para o ano de 2012.....	30
Figura 7.7 – Valores de PWV dos cinco sensores GPS para abril de 2012.....	31
Figura 7.8 – Mapa com a localização e identificação de estações GPS (IGEO, FCUL, IGP0 e PCAR) e destaque para a estação automática de superfície de Gago Coutinho (579), local onde eram lançadas as radiossondagens em 2012. ....	31
Figura 7.9 – Comparação dos valores de TPW, da estação 579, e os valores de PWV da estação IGP0 para o ano de 2012. ....	32
Figura 7.10 – Comparação dos valores de TPW, da estação 579, e os valores de PWV da estação (a) FCUL e (b) IGEO, para o ano de 2012. ....	32
Figura 7.11 – Gráfico de dispersão entre os dados de TPW (EMA 579) e PWV (IGP0). ....	33
Figura 7.12 – Gráfico que compara o TPW da radiossondagem da estação 597 e o PWV da estação IGP0 para o período das 12 UTC de dia 17.setembro.2012 às 18 UTC de dia 28.setembro.2012. .	33
Figura 7.13 – Gráfico que compara o TPW da radiossondagem da estação 597 e o PWV da estação IGP0 para o período das 12 UTC de dia 13.outubro.2012 às 18 UTC de dia 30.outubro.2012.....	34
Figura 7.14 – Precipitação horária registada nas (a) EMAs (I) e (b) EMAs (I e II), durante o ano de 2012.....	34
Figura 7.15 – Precipitação horária registada nas EMAs e RUEMAs durante o ano de 2012. ....	35
Figura 7.16 – Comparação anual entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR) e precipitação horária das estações automáticas. ....	35
Figura 7.17 – Comparação mensal entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR) e precipitação horária das estações automáticas.....	37
Figura 7.18 – (a) Comparação entre os valores de RAIN1, entre 20 a 30 de setembro de 2012, derivados do produto radar SRI e do produto radar PCAPPI(R) a 700 m e (b) o respetivo gráfico de dispersão.....	38

Figura 7.19 – Comparação da precipitação horária observada pelas estações automáticas e o produto RAIN1 para o ano de 2012.....	38
Figura 7.20 – Comparação da precipitação horária observada pelas estações automáticas e o produto RAIN1 para abril de 2012. ....	39
Figura 7.21 – Comparação anual entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR), precipitação horária das estações automáticas e produto RAIN1 do radar de CCL.....	39
Figura 7.22 – Comparação mensal entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR), precipitação horária das estações automáticas e produto RAIN1 do radar de CCL. ....	41
Figura 7.23 – <i>Cross-section</i> do diagrama de propagação da radiação do conjunto dos sub-rastreios da refletividade, com identificação do ângulo (em °) correspondente a cada elevação, do radar de CCL.....	42
Figura 7.24 – Mapa com área de estudo em destaque com identificação dos vértices que a constituem (barra verticais brancas), a distância horizontal (em km) correspondente à estação radar de CCL (linhas a preto) e as altitudes de observação (valores a verde e roxo) em função dos ângulos de elevação 0,1°, 2,9°, 3,9°, 7,2° e 8,5°. Nota: as altitudes não estão à escala.....	43
Figura 7.25 – Mapa com a sobreposição da malha radar, com resolução de 5 km x 5 km, (quadrados a cor-de-laranja) e com os pontos utilizados da malha radar (círculos a amarelo) sobre a área de estudo (retângulo azul).....	44
Figura 7.26 – Gráfico de PWV e os valores máximos do produto MAX(Z) para o mês de outubro de 2012.....	45
Figura 7.27 – Gráfico de PWV, valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o mês de outubro de 2012. ....	45
Figura 7.28 – Gráfico de PWV (5 sensores), valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o período de 1 a 15 de outubro de 2012. Período das 12 UTC de dia 7 às 12 UTC de dia 10 de outubro de 2012 delimitado por barras verticais a preto e instantes 16 UTC e 17 UTC de dia 8, 14 UTC de dia 9 e 01, 02 e 03 UTC de dia 10 de outubro identificados, respetivamente, por barras verticais a tracejado roxo, cor-de-laranja e azul claro.....	46
Figura 7.29 – Gráfico de PWV (5 sensores), valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o período de 16 a 31 de outubro de 2012. ....	46
Figura 7.30 – Produto RAIN1 das (a) e (b) 16 e 17 UTC de dia 8, (c) 14 UTC de dia 9, (d) a (f) 01 a 03 UTC de dia 10 de outubro de 2012, do radar de CCL.....	47
Figura 7.31 – (a) Carta da análise de superfície das 00 UTC de dia 14 de janeiro de 2012 ( <i>MetOffice</i> ) e (b) produto MAX(Z), do radar de CCL, das 2130 UTC de dia 14 de janeiro de 2012. ....	48
Figura 7.32 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGP0, CASC e PCAR e os valores máximos do produto MAX(Z) para o intervalo das 1130 UTC de dia 14 de janeiro às 1200 UTC de dia 16 de janeiro de 2012.....	48
Figura 7.33 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGP0, CASC e PCAR, os valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o intervalo das 1130 UTC de dia 14 de janeiro às 1200 UTC de dia 16 de janeiro de 2012. ....	49
Figura 7.34 – (a) Carta da análise de superfície das 00 UTC de dia 15 de março de 2012 ( <i>MetOffice</i> ) e (b) produto MAX(Z), do radar de CCL, das 1650 UTC de dia 15 de março de 2012 (b).....	49
Figura 7.35 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGP0, CASC, FCUL e PCAR e os valores máximos do produto MAX(Z) para o dia 15 de março de 2012. ....	50
Figura 7.36 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGP0, CASC, FCUL e PCAR, os valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o dia 15 de março de 2012.....	50

Figura 7.37 – (a) Carta da análise de superfície das 00 UTC de dia 15 de agosto de 2012 ( <i>MetOffice</i> ) e (b) produto MAX(Z), do radar de CCL, das 0100 UTC de dia 15 de agosto de 2012. ....	51
Figura 7.38 – Gráfico de PWV dos cinco sensores GPS e os valores máximos do produto MAX(Z) para o intervalo das 12 UTC de dia 14 de agosto às 12 UTC de dia 15 de agosto de 2012. ....	51
Figura 7.39 – Gráfico de PWV dos cinco sensores GPS, os valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o intervalo das 12 UTC de dia 14 de agosto às 12 UTC de dia 15 de agosto de 2012. Instantes das 12, 13, 14 e 15 UTC de dia 14 de agosto de 2012 identificados por barras verticais a tracejado cor-de-laranja. ....	52
Figura 7.40 – Produto RAIN1, do radar de CCL, das (a) 12, (b) 13, (c) 14 e (d) 15 UTC de dia 14 de agosto de 2012. ....	53
Figura 7.41 – Gráfico de PWV, valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o intervalo das 00 UTC de dia 23 de agosto às 24 UTC de dia 25 de agosto de 2012. Instantes das 02, 03, 04 e 05 de dia 25 de agosto de 2012 identificados por barras verticais a tracejado cor-de-laranja. ....	54
Figura 7.42 – Produto RAIN1 das (a) 02 UTC, (b) 03 UTC, (c) 04 UTC e (d) 05 UTC de 25 de agosto de 2012, do radar de CCL. ....	54

## Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

A	Área
AED	Azimutal equidistante
APG	Radar Meteorológico de Arouca (Pico do Gralheiro)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CCL	Radar Meteorológico de Coruche (Cruz do Leão)
CSR	<i>Clutter-to-signal ratio</i>
dgT	Direção Geral do Território
EMA	Estação Meteorológica Automática
EUREF	<i>European Reference Frame</i>
$\Phi$	Latitude geodésica
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
g	Aceleração da gravidade
G	Ganho
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Americano)
GLONASS	Sistema de navegação Global por satélite (Russo)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
h	Comprimento do impulso
$H_{ref}$	Altura acima do geoide
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IGEOE	Centro de Informação Geoespacial do Exército
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P.
IRIS	<i>Interactive Radar Information System</i>
k	Coeficiente de absorção
K	Caraterísticas da precipitação
KDP	Fase diferencial específica
$\lambda$	Comprimento de onda

LCC	Radar Meteorológico de Loulé (Cavalos do Caldeirão)
LOG	<i>Signal-to-noise ratio</i>
LWC	<i>Liquid Water Content</i>
m	Índice (complexo) de refração
M-GPS	Meteorologia GPS
MAX(Z)	Máximos de refletividade radar
mM(Z)	Máximo de MAX(Z)
$\eta$	Refletividade radar por unidade de volume
n	Índice de refração
p	Pressão
$p_{\text{sup}}$ ou $P_0$	Pressão à superfície
PCAPPI	<i>Pseudo Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
PMI	<i>Polarimetric meteo index</i>
PPE	Radar Meteorológico de Porto Santo (Pico do Espigão)
PPI	Indicador de posição plana
$P_r$	Potência recebida
$P_t$	Potência transmitida de pico
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
PWV	<i>Precipitable Water Vapour</i>
q	Razão de mistura
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
r	Distância
R	Intensidade de Precipitação
$R_v$	Constante específica do gás para o vapor de água
RADAR	<i>RAdio Detection And Ranging</i>
RAIN1	Precipitação acumulada em 1h
ReNEP	Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RLAN	<i>Radio Local Area Network</i>
RUEMA	Rede Urbana Estação Meteorológica Automática
$\rho_w$	Densidade da água
$\sigma$	Secção transversal de retro difusão
SERVIR	Sistema de Estações de Referência GNSS VIRTuais
SRI	<i>Surface Rainfall Intensity</i>
STD	<i>Slant Total Delay</i>
$\Theta$	Largura do feixe
$T_m$	Temperatura média
TPW	<i>Total Precipitable Water</i>
TSB	Radar Meteorológico de Terceira (Santa Bárbara)
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
V	Volume de resolução
VIL	<i>Vertically Integrated Liquid</i>
Z	Fator refletividade radar
ZDR	Refletividade diferencial
ZHD	<i>Zenith Hydrostatic Delay</i>
ZTD	<i>Zenith Total Delay</i>
ZWD	<i>Zenith Wet Delay</i>

# 1. Introdução

## 1.1 Introdução e Motivação

A meteorologia GPS (M-GPS) tem vindo a merecer ao longo dos últimos anos um crescente destaque, em particular na utilização de vapor de água precipitável (PWV) como uma variável de importância maior para o *nowcasting* (Baker, et al. 2001), (Champollion, Flamant, et al. 2009), (Benevides, Catalao e Miranda 2015) e (Miranda e Mateus 2021). A melhoria na previsão que daqui possa ocorrer não só beneficiará a meteorologia como áreas transversais como a agricultura, sistemas de alertas para *flash floods*, gestão de recursos hídricos e salvaguarda de vidas e bens.

O conceito de M-GPS apareceu durante a década de noventa (Bevis, Businger e Herring, et al. 1992) (Bevis, et al. 1994) (Duan, et al. 1996), e consiste no uso de informação proveniente de sensores de GPS, para a estimativa de valores de PWV. Gradualmente, foi-se obtendo proveito deste conceito, para que o mesmo fosse útil como instrumento em aplicações meteorológicas, como comprovam vários estudos que o associam à previsão meteorológica (Baker, et al. 2001), à previsão numérica (Boniface, et al. 2009), a casos de estudo que envolvam episódios de precipitação intensa (Champollion, Masson, et al. 2004) (Champollion, Flamant, et al. 2009) e ao *nowcasting* (Karabatić A 2011) (Benevides, Catalao e Miranda 2015). Outras valências podem ser encontradas na aplicação de informação baseada em PWV, como a um episódio de passagem de um ciclone tropical (Zhao, Yao e Tao 2018) e à utilização de redes neurais para melhorar a previsão com base em PWV (Khaniani, Motieyan e Mohammadi 2021) e (Jain, et al. 2020).

O vapor de água é um dos parâmetros meteorológicos que tem um papel fundamental na ocorrência de precipitação à superfície. A presença deste componente na atmosfera influencia o sinal proveniente de redes de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), mecanismo explicado detalhadamente mais à frente, sendo que este comportamento pode ser utilizado em benefício de uma estimativa da quantidade do vapor de água presente na atmosfera. Atualmente, a M-GPS é considerada uma ferramenta importante para a meteorologia devido à sua resolução temporal. A possibilidade de complementá-la e otimizá-la através de informação proveniente de um radar meteorológico representará uma mais-valia, pela resolução temporal e espacial que este último apresenta. A maioria dos artigos, no âmbito da M-GPS e que utilizam informação de produtos radar, usam-na como comparação e/ou referência (Van Baelen, et al. 2011) (Manning, et al. 2012) perante os algoritmos de previsão desenvolvidos e não como uma variável assimilada, como acontece por exemplo com o vapor de água precipitável (PWV) derivado de redes GNSS. A utilização de informação proveniente de um radar meteorológico que permite, por um lado, um diagnóstico célere do estado da atmosfera e, por outro, uma previsão a curto prazo, ou seja, para fins de *nowcasting*, poderá representar um valor acrescido à interpretação da variação da informação de PWV.

Neste contexto, a ausência de bibliografia que descreva mecanismos de integração de informação radar com informação GPS e a escassa complementaridade de meteorologia radar e M-GPS, representa, portanto, um desafio acrescido. Nesse sentido, este estudo procura identificar relações entre ambos e dar os primeiros passos na sinergia GNSS-RADAR.

## 1.2 Objetivos

O objetivo do presente estudo aborda a potencialidade de aplicar informação proveniente de um radar meteorológico da banda C em complementaridade com informação proveniente de sensores de redes GNSS, nomeadamente o GPS, na previsão a muito curto prazo de episódios de precipitação. Ou seja, é avaliada a existência, ou não, de uma correlação entre os sensores de GPS e o radar meteorológico que possa conduzir a uma melhor previsão temporal, nomeadamente na sua antecipação, na ocorrência de precipitação.

Deste modo, o presente trabalho divide-se em várias vertentes, mas todas elas necessárias para uma visão integrada do objetivo principal. Assim, são analisados os seguintes pontos específicos: i) validação do uso de informação PWV proveniente de sensores de GPS para estimar a quantidade de água precipitável com recurso a informação de água total precipitável (TPW) das radiossondagens observadas; verificação se com o aumento da frequência das observações em altitude, continua a existir a excelente correlação com os valores de TPW; ii) utilização do radar meteorológico, com recurso a produtos hidrológicos, para verificar a existência de outros episódios de precipitação não registados pelas estações de superfície; iii) utilização de informação radar como referência para reforçar a capacidade do PWV como preditor a curto prazo; identificação de episódios de precipitação através do produto radar de precipitação horária acumulada RAIN1, obtido através do *input* do produto radar SRI (*Surface Rainfall Intensity*); iv) utilização de informação proveniente das diversas elevações dos rastreios e obter informação sobre altitudes mais elevadas nas verticais dos sensores de GPS com recurso ao produto radar de máximos de refletividade (MAX(Z)); será comparado e determinado o comportamento entre o MAX(Z) e o PWV, e avaliada a relação entre ambos, nomeadamente na capacidade de antecipação com efeitos em sede de *nowcasting*.

## 1.3 Precipitação de origem convectiva

A maior dificuldade que existe na previsão do tempo de mesoscala, devido à natureza totalmente tridimensional e turbulenta da atmosfera, quando comparada com a escala sinóptica em que a dinâmica semi-geostrófica e de evolução mais lenta permite uma previsão muito mais previsível (Yano, et al. 2018), origina igualmente uma maior incerteza na previsão de fenómenos de precipitação mais intensa. Por outro lado, em determinadas situações, o processo génese/crescimento/maturação de núcleos convectivos em nuvens *Cumulonimbus* ocorre de forma bastante célere, adicionando uma dificuldade acrescida. Na Figura 1.2 e Figura 1.3 são ilustrados dois casos em que, através de um produto radar de intensidade de precipitação, PCAPPI(R), são visíveis zonas que, inicialmente, não apresentam qualquer informação observada por radar e, em poucas dezenas de minutos, são representados valores significativos de intensidade de precipitação ( $> 25 \text{ mmh}^{-1}$ ) sobre a região da Grande Lisboa, consequentes de nuvens precipitantes resultantes de condições favoráveis à convecção. O primeiro caso resulta de uma situação sinóptica caracterizada por uma região depressionária complexa, com um núcleo centrado na Península Ibérica e outro a norte da Madeira, com expressão em altitude (Figura 1.1 (esquerda)). O segundo caso, por um fluxo do quadrante Sul que afetou principalmente as regiões do centro e sul, devido a uma depressão que se encontrava a sudoeste de Portugal Continental (Figura 1.1 (direita)), inserido numa massa de ar tropical marítima, ar húmido, com valores de água precipitável total superiores a 30 mm (Espírito Santo 2016).

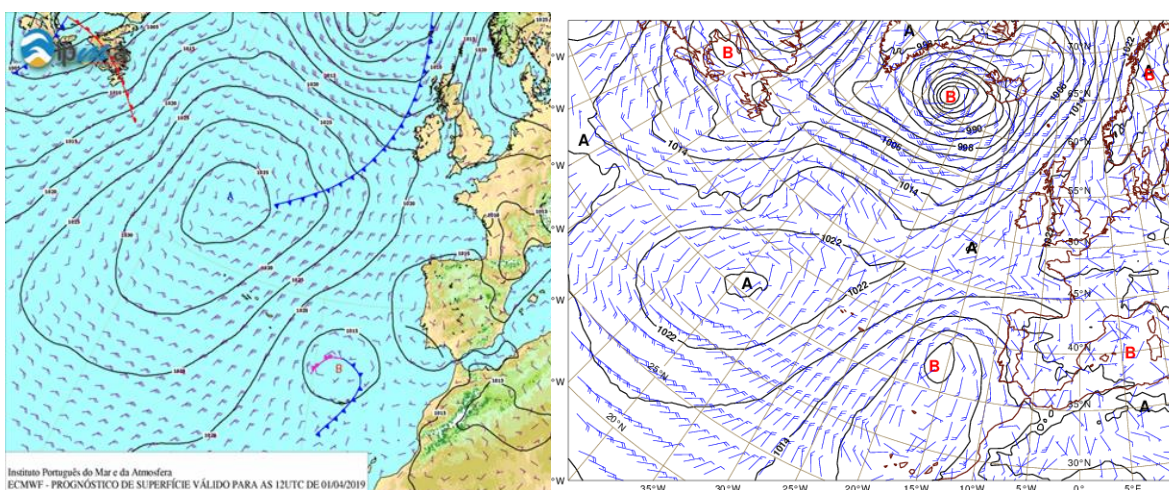


Figura 1.1 – Carta de prognóstico de superfície para as 12 UTC, de dia 1 de abril de 2019 (IPMA) (esquerda) e de dia 25 de outubro de 2016 (direita) (ECMWF) (pressão a nível do mar (linhas a preto, 4 em 4 hPa) e vento a 10 m (barbelas, kt)).

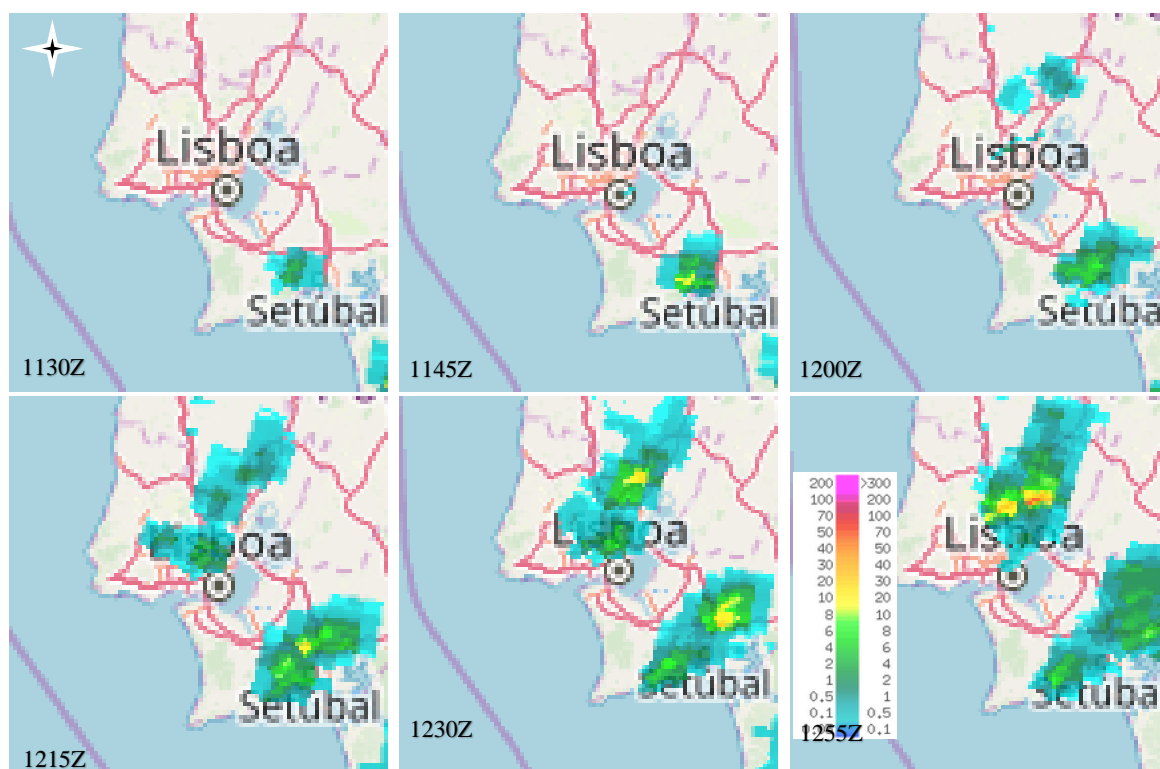


Figura 1.2 – Produto PCAPPI de R (em  $\text{mmh}^{-1}$ ), da elevação mais baixa ( $0,1^\circ$ ), para os instantes 1130, 1145, 1200, 1215, 1230 e 1255 UTC, de dia 1 de abril de 2019, do radar de CCL.

No segundo caso, é ainda mais evidente a célere geração de núcleos convectivos com as respetivas imagens de intensidade de precipitação estimadas pelo radar.

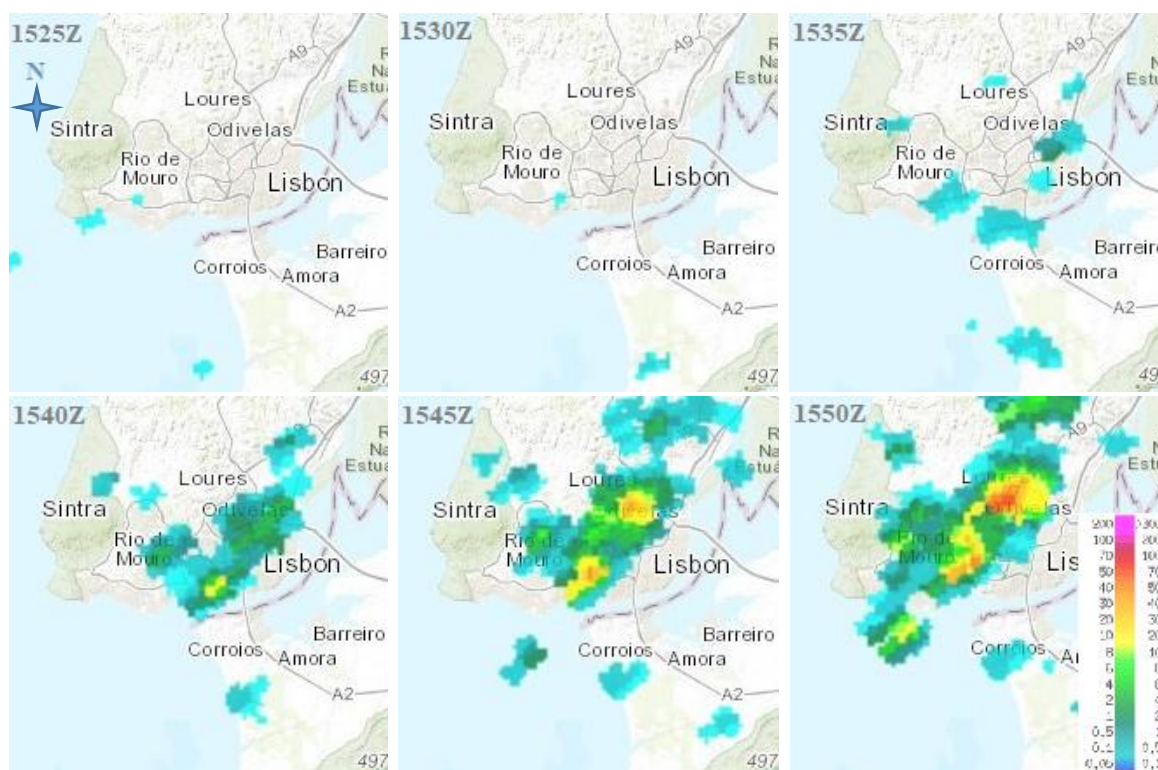


Figura 1.3 – Produto PCAPPI de R (em  $\text{mmh}^{-1}$ ), da elevação mais baixa ( $0,1^\circ$ ), para os instantes 1525, 1530, 1535, 1540, 1545 e 1550 UTC, de dia 25 de outubro de 2016, do radar de CCL.

Ambas as situações enquadram-se num cenário em que a rede GNSS pode representar um valor acrescido na deteção preliminar da convecção profunda (Adams, et al. 2010). Assim, o presente estudo representará uma maior relevância sobre episódios de precipitação de origem convectiva, e consequentemente mais intensa, comparativamente a situações de precipitação de origem estratificada.

## 1.4 Estrutura da Tese

O primeiro capítulo apresenta a introdução e descreve os motivos e objetivos a que se propõe a tese. São ainda mostradas duas situações meteorológicas, associadas a episódios de convecção para ilustrar o desafio da previsão, temporal e espacialmente, em situações de natureza convectiva. O segundo capítulo apresenta, um resumo sobre o vapor de água na atmosfera. O enquadramento teórico sobre os sensores GPS e o radar meteorológico estão descritos, respetivamente, nos capítulos 3 e 4. No capítulo 5 é descrita a área de estudo e aborda os fatores que podem desvirtuar a informação radar. O capítulo 6 é dedicado à descrição dos sensores (recetores GPS, estações de superfície e radar meteorológico) que deram origem aos dados utilizados. No capítulo 7 são tratados os dados e realizadas várias comparações, sendo que na parte final são analisados alguns casos de estudo. No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e possível trabalho futuro a realizar neste âmbito. Finalmente, os capítulos 9 e 10 contêm, respetivamente, as referências utilizadas no texto e acessos a fontes digitais e os anexos.

## 2. Vapor de água na atmosfera

A atmosfera é responsável pelo transporte de água dos Oceanos para os Continentes e desempenha um papel importante na modelação da precipitação (Peixoto 1995). A atmosfera nunca está completamente seca, ou seja, o ar, húmido, é uma mistura de ar seco com vapor de água. A quantidade de vapor de água na atmosfera varia muito no espaço e no tempo e, em média, a tensão do vapor de água diminui com a altitude. Enquanto as concentrações dos componentes maioritários e dos gases inertes são praticamente constantes no espaço e no tempo, as concentrações da generalidade dos componentes minoritários varia bastante de ponto para ponto e ao longo do tempo. O vapor de água, em particular, apresenta grandes variações de concentração, sendo o único componente relevante que tem a possibilidade de realizar transições de fase (P. Miranda 2001). À superfície, os maiores valores verificam-se nas regiões oceânicas tropicais e os menores valores ocorrem no Inverno, no interior dos continentes, nas latitudes elevadas. O vapor de água, responsável por cerca de 0,25% da massa da atmosfera, é um constituinte altamente variável, com concentrações que variam de cerca de 10 partes por milhão em volume nas regiões mais frias da atmosfera terrestre até 5% por volume em massas de ar quentes e húmidas (Wallace e Hobbs 2006). O vapor de água entra na atmosfera a partir da superfície da Terra, principalmente por processos de evaporação das superfícies de água e por transpiração das plantas. Mas, mesmo com uma percentagem baixa, importa salientar que quantidades relativamente pequenas de vapor de água podem produzir grandes variações no estado do tempo. Este facto deve-se, em maioria, às alterações de concentração de vapor de água que ocorrem na camada mais baixa da atmosfera, a troposfera, em particular na camada entre a superfície e os 6 km. Por exemplo, uma pequena quantidade de vapor de água pode absorver uma grande quantidade de radiação infravermelha, integrando com o dióxido de carbono, o ozono e outros constituintes, o grupo de gases de efeito de estufa. Por outro lado, o vapor de água pode passar a água líquida ou a gelo, e a quantidade de energia envolvida nestas mudanças de fase é substancial, mesmo quando as quantidades de vapor de água envolvidas são pequenas.

## 3. Sensores GPS

A utilização de sensores de GPS para a estimativa da quantidade de vapor de água na troposfera, tem crescido ultimamente numa tentativa de utilização na previsão a muito curto prazo. Esta vertente resulta principalmente devido ao aumento de redes de sistemas de navegação, em primeiro lugar, e, em segundo, ao aumento de sensores de GNSS instalados à superfície, como é o caso do programa *EIG EUMETNET GPS Water Vapour* (E-GVAP) (Guerova, et al. 2016) (Figura 3.1), aumentando a densidade geográfica deste tipo de rede.



Figura 3.1 – Evolução do número de estações de superfície GNSS a fornecer informação ZTD para fins operacionais de modelos de previsão numérica no âmbito do programa *EIG EUMETNET GPS Water Vapour Programme* (adaptado de (Guerova, et al. 2016)).

Estudos com referência ao GNSS têm, necessariamente, de mencionar as principais redes de sistemas de navegação: o GPS (Americano), o GLONASS (Russo), GALILEO (Europeu) e o CNSS (Compass/BeiDou) da China (Resources 2022). Ainda de referir o caso particular da rede *Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)*, que constitui um sistema de reforço relativamente ao GPS, para ser utilizado na região Ásia-Oceânia com o foco principal sobre o Japão (QZSS 2022).

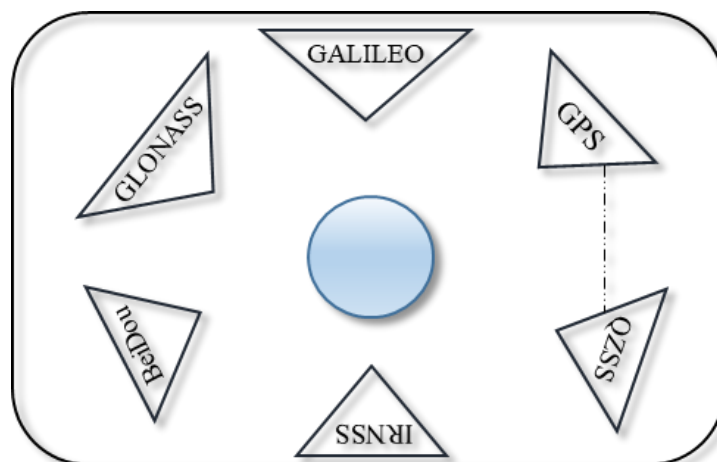


Figura 3.2 – Ilustração dos vários sistemas de navegação por satélite.

Doravante será considerado o nome GPS, em detrimento da expressão generalizada de sistema de navegação por satélite GNSS, pois os dados utilizados para o cálculo do PWV resultaram unicamente da informação proveniente da rede GPS e não de outra, como os ilustrados na Figura 3.2.

A meteorologia GPS pode ser dividida em duas grandes valências: espaço e superfície. Ou seja, o atraso atmosférico sofrido pelo sinal GPS pode ser dividido em duas componentes: atraso ionosférico e atraso troposférico.

O primeiro é causado pela presença de íões e elétrons livres na ionosfera sendo que o efeito das cargas elétricas na camada provoca uma dispersão e uma refração dos sinais rádios do GPS. A M-GPS baseada no espaço está relacionada com a medição do atraso de sinal ou da ocultação de sinal entre satélites, podendo fornecer perfis integrados de refratividade. Exemplos práticos desta valência são por exemplo: i) a ROM SAF (SAF 2022), do consórcio SAF, o Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF), que em março de 2020, começou a assimilar a medição de ocultação radio provenientes de redes GNSS (GNSS-RO) por intermédio das missões FORMOSAT-7/COSMIC-2 (ECMWF 2020); ii) alguns estudos como (Yue, et al. 2014) e (Zhang, et al. 2018). Em concreto, estas técnicas baseiam-se em dados obtidos a partir dos sinais enviados entre satélites que, ao atravessarem a atmosfera, no seu trajeto sofrem desvios em resultado da refração, sendo que o ângulo do desvio possibilita obter informação sobre os parâmetros temperatura e humidade.

Por sua vez, o atraso troposférico, como o nome indica, ocorre na camada mais baixa da atmosfera. O sinal GPS ao percorrer a troposfera, que contém cerca de 80% da massa da atmosfera e com a sua espessura a variar em função da latitude, irá sofrer interações, em particular com a presença de vapor de água. Assim, a presença de vapor de água na atmosfera atrasa, no seu trajeto, a propagação do sinal proveniente dos sensores de GPS antes de o mesmo chegar à superfície e, por conseguinte, é possível estimar a quantidade de vapor de água na coluna atmosférica na *vertical* de cada sensor (Duan, et al. 1996).

Genericamente, o parâmetro *Zenith Total Delay* (ZTD), que é medido em cada um dos sensores de GPS à superfície (ver Figura 3.3), pode ser decomposto no somatório de duas componentes: o *Zenith Wet Delay* (ZWD) e o *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD).

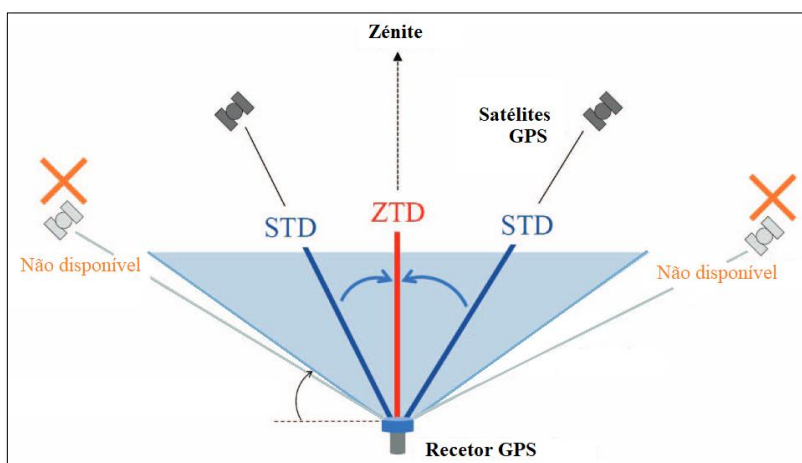


Figura 3.3 – Trajetos do sinal proveniente da rede de satélites do sistema de navegação, na qual se identificam os trajetos do *Slant Total Delay* (STD) (segmentos de reta a azul) e o *Zenith Total Delay* (ZTD) (segmento de reta a vermelho) obtidos no receptor GPS (adaptado de (Kazuaki Imaoka 2019)).

Ou seja, o valor de ZTD pode ser diretamente obtido de cada um dos sensores, e pode ser decomposto numa componente seca (ou hidrostática), que representa não menos que 90% do atraso troposférico, e húmida (não hidrostática), que representa os restantes 10%, e que está relacionada com a distribuição do vapor de água (Benevides, Catalao e Miranda 2015). A componente ZHD pode ser estimada com bastante rigor e varia lentamente ao longo do tempo, enquanto a componente não

hidrostática varia rapidamente no tempo e, conseqüentemente, mais difícil de estimar, resultado da grande variabilidade do vapor de água na troposfera.

Do referido anteriormente, temos na Figura 3.4 de forma esquemática.

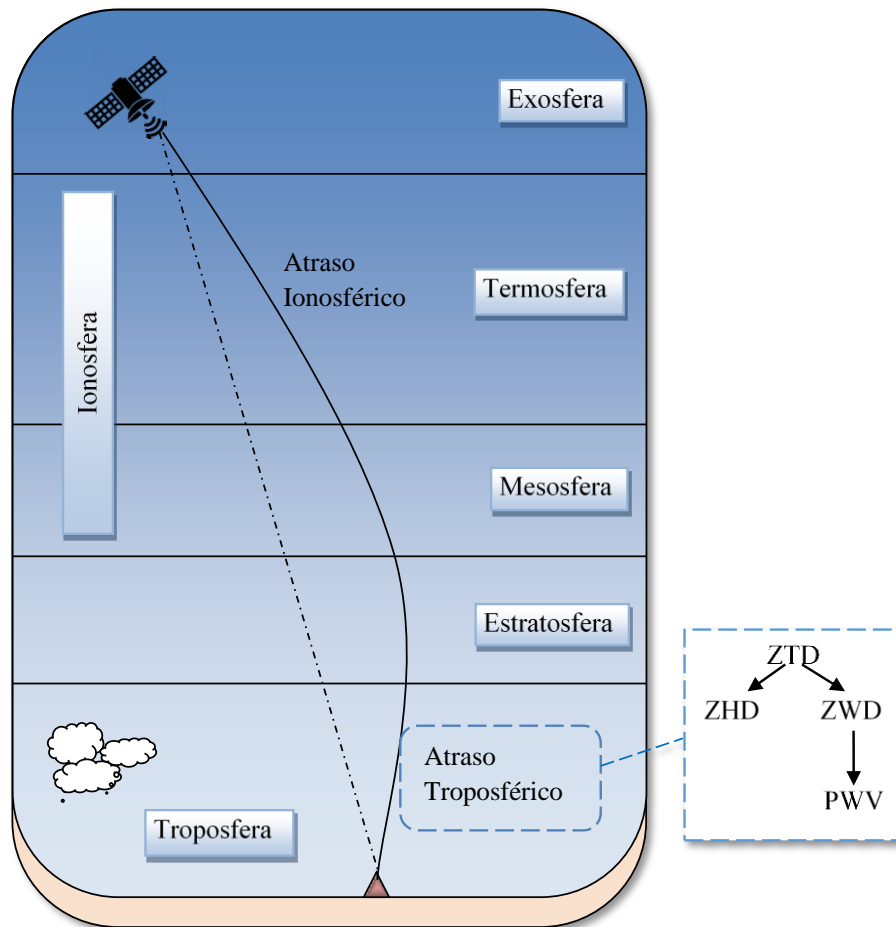


Figura 3.4 – Esquema do trajeto percorrido pelo sinal GPS entre o satélite e a estação à superfície, na qual se destaca a passagem pela ionosfera e pela troposfera.

O cálculo do valor da água precipitável, PWV, na troposfera, para cada um dos recetores de GPS, foi baseado no atraso troposférico, nomeadamente no descrito em (Benevides, Catalao e Miranda 2015).

A estimativa de ZHD pode ser realizada, com rigor, utilizando as medições do valor da pressão atmosférica ao nível de cada estação recetora GPS seguindo (Saastamoinen 1972):

$$ZHD = \frac{0,002277 P_0}{1 - 0,00266 \cos(2\Phi) - 0,00028 H_{ref}} \quad (3.1)$$

onde  $P_0$  é a pressão à superfície (hPa),  $\Phi$  é a latitude geodésica e  $H_{ref}$  representa a altura (em km) acima do geoide. Assim, ZHD é proporcional a  $P_0$ . Após a determinação de ZHD, ZWD é calculado subtraindo ZHD de ZTD.

A relação empírica entre o PWV e ZWD foi proposta por (Bevis, Businger e Herring, et al. 1992):

$$PWV = kZWD, \quad \text{com } k = \frac{10^6}{\left(\frac{k_3}{T_m} + k_2\right) R_v \rho} \quad (3.2)$$

onde  $k_3$  e  $k_2'$  são constantes empíricas,  $R_v$  é a constante específica do gás para o vapor de água,  $\rho$  é a densidade da água líquida e  $T_m$  é a temperatura calculada a partir da superfície obtida por uma relação empírica, geralmente a partir de um conjunto de dados de radiossondagens ou de reanálises (Bevis, et al. 1994). Os dados de GPS, nomeadamente a estimativa de PWV, utilizados neste estudo basearam-se no cálculo de  $T_m$  com base num ano de dados de radiossondagens da estação de Gago Coutinho (Mateus, Nico e Catalão 2014).

## 4. Radar Meteorológico

O acrónimo RADAR significa, na língua inglesa, *Radio Detection And Ranging* (Nature 1943), que na época se destinava a nomear um sensor de uso exclusivo para a vertente militar. A dicotomia que ocorreu, desde o final da 2ª guerra mundial, permitiu a continuidade da evolução da tecnologia radar para fins militares e o início do desenvolvimento desta tecnologia para fins civis, em concreto, para a observação da atmosfera, que aliás, presentemente continua a sofrer transformações nas várias componentes que o constituem.

O radar meteorológico caracteriza-se por ser um instrumento de observação remota, de elevada complexidade, que envia impulsos de energia eletromagnética para atmosfera para fins de vigilância meteorológica e de previsão a muito curto prazo, vulgo *Nowcasting*. O radar meteorológico, muitas vezes conhecido como radar meteorológico *doppler*, tem como principais objetivos a deteção de precipitação (tipo e intensidade), estimada em função da refletividade radar, em que esta por sua vez é calculada através da potência média recebida na antena radar, como se verá no subcapítulo 4.1.2, determinar o movimento de padrões, *e.g.* células convectivas, estimando a intensidade e a velocidade de advecção ou mesmo a sua evolução e, no caso de radares meteorológicos de polarização dupla, determinar a natureza dos retro difusores, nomeadamente dos hidrometeoros (*e.g.* chuva, neve e granizo).

Atualmente, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), possui uma rede de radares meteorológicos, em exploração operacional, constituída por 5 radares meteorológicos *doppler*, sendo que dois (Coruche / Cruz do Leão (CCL) e Loulé / Cavalos do Caldeirão (LCC)) são de polarização simples e três (Arouca / Pico do Gralheiro (APG), Porto Santo / Pico do Espigão (PPE) e Terceira / Pico de Santa Bárbara (TSB)) de polarização dupla. A curto prazo, no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência Radar, os radares do centro e sul do continente, CCL e LCC, por se tratarem, precisamente, de radares de polarização simples e os mais antigos em exploração operacional, 1998 e 2005, respetivamente, serão substituídos por radares de polarização dupla. Simultaneamente serão instalados dois novos radares *doppler* de polarização dupla no Arquipélago dos Açores, um no grupo oriental na ilha de S. Miguel (Pico Santos de Cima (SPS)) e outro no grupo ocidental na ilha das Flores (Flores / Morro Alto (FMA)), elevando o número que constitui a rede radar para um total de sete radares (Figura 4.1).

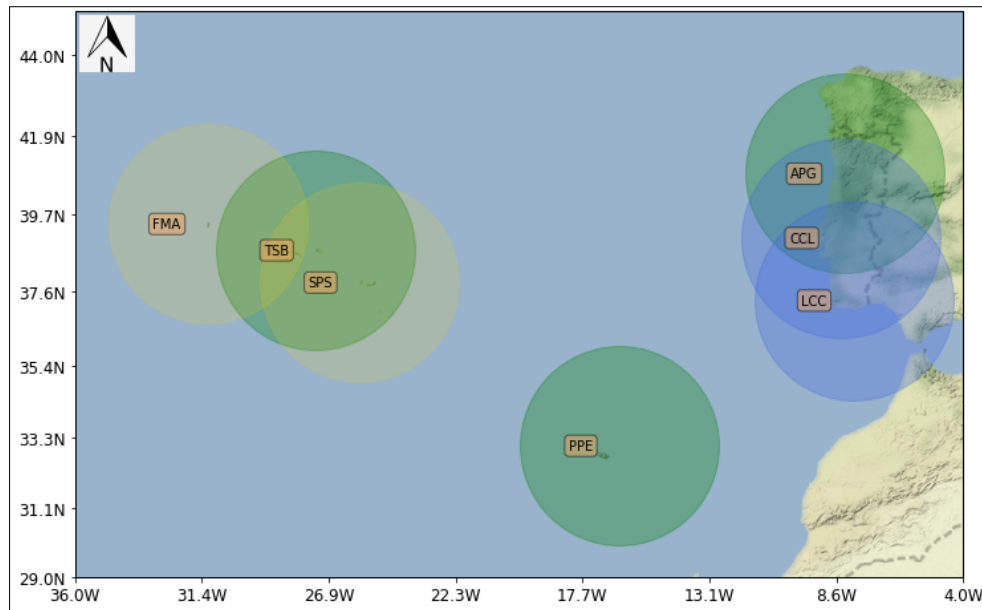


Figura 4.1 – Rede nacional de radares meteorológicos do IPMA. Os radares de polarização dupla (APG, PPE e TSB) estão identificados a verde, os radares de polarização simples (CCL e LCC) estão identificados a azul e os futuros radares da Região Autónoma dos Açores (FMA e SPS) estão identificados a castanho claro. Todos os círculos centrados nos radares têm um alcance de 300 km.

Todos os radares operados pelo IPMA são radares da banda C, ou seja, têm uma frequência de trabalho compreendida entre os 3,9 GHz e os 6,2 GHz o que corresponde a um  $\lambda$  entre 7,7 cm a 4,8 cm, sendo que os do IPMA trabalham com uma frequência na vizinhança dos 5,6 GHz, ou seja, com um  $\lambda$  aproximado de 5,3 cm.

## 4.1 Equação Radar

Os subcapítulos 4.1.1 e 4.1.2 que descrevem a dedução da equação radar e o subcapítulo 4.2 sobre a relação entre o conteúdo do vapor de água, a refletividade e a precipitação basearam-se em (Battan 1973).

### 4.1.1 Equação radar para um alvo pontual

A quantidade de energia retro difundida por um alvo na atmosfera determinará se o mesmo será detetado, tendo em consideração as características do radar meteorológico em utilização. A equação radar estabelece uma relação entre a potência recebida, as características radar e o tipo de alvo.

Numa primeira análise, consideremos um alvo pontual, ou seja, um alvo sem extensão espacial considerável, e que o radar transmite uma potência de pico  $P_t$ . Se esta transmissão fosse irradiada isotropicamente, uma área pequena  $A_r$  à distância  $r$  intercetaria uma quantidade de potência dada por

$$P_\sigma = \frac{P_t A_r}{4\pi r^2}. \quad (4.1)$$

A antena radar é usada para focar a energia num feixe estreito, aumentando consideravelmente a potência em relação ao valor irradiado isotropicamente. Nesse caso, uma área pequena  $A_r$  intercetaria uma quantidade de potência dada por

$$P_\sigma = G \frac{P_t A_r}{4\pi r^2}, \quad (4.2)$$

sendo  $G$  um número adimensional denominado por ganho axial da antena.

Se a área referida anteriormente retrodifundisse a radiação incidente isotropicamente, a potência que seria recebida numa antena com uma área de abertura  $A_e$  seria

$$P_r = \frac{P_\sigma A_e}{4\pi r^2} = \frac{GP_t A_t A_e}{(4\pi r^2)^2}. \quad (4.3)$$

Como o ganho e a abertura da antena estão aproximadamente relacionados (Silver 1949) por

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}, \quad (4.4)$$

a equação (4.3) pode reescrever-se como

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} A_t. \quad (4.5)$$

Como a maioria dos alvos não dispersa isotropicamente, é introduzida, por conveniência, uma nova variável  $\sigma$ , denominada por secção transversal de retrodifusão do alvo radar e definida por

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma. \quad (4.6)$$

A equação (4.6) é a equação radar para um único alvo com uma secção transversal de retro difusores  $\sigma$ .

#### 4.1.2 Equação radar generalizada

Os hidrometeoros (gotas de chuva, neve, granizo) ou mesmo as nuvens no seu todo são exemplos de classe de alvos, fundamentais para a meteorologia radar, classificados como alvos distribuídos. Tais alvos são caracterizados pela presença de elementos com capacidade efetiva de retrodifusão quando atingidos, no mesmo instante, por um impulso de energia emitido pelo radar. Ao volume que contém este tipo de elementos/alvos é chamado volume de resolução radar, sendo o mesmo determinado pela largura do feixe e do comprimento do impulso radar. Por outro lado, para os alvos distribuídos cujos elementos constituintes sejam animados de movimento e, portanto, se deslocam entre si, observa-se que a potência que é recebida na antena radar varia no tempo. Esta evolução intrínseca, seja ela de crescimento ou de dissipação de uma nuvem, e velocidades de queda diferentes entre os vários hidrometeoros contribuem para esta variação. Logo, o sinal recebido no radar não dependerá só das secções transversais dos retrodifusores, mas também da sua distribuição no volume de resolução.

Da equação (4.6) e considerando um tempo médio da ordem dos  $10^{-2}$  s, a potência média recebida a uma determinada distância é dada por

$$\bar{P}_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \Sigma \sigma, \quad (4.7)$$

onde  $\Sigma \sigma$  é a soma das secções transversais de retrodifusão de todas as partículas que se encontram no interior do volume de resolução  $V$ , sendo que este pode ser descrito por

$$V = \pi \left( \frac{r\theta}{2} \right)^2 \frac{h}{2}, \quad (4.8)$$

onde  $h$  é o comprimento do impulso, dado por  $h = c.\tau$ , e  $\theta$  é a largura do feixe.

Por sua vez, combinando as equações (4.7) e (4.8), temos

$$\bar{P}_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \pi \left(\frac{r\theta}{2}\right)^2 \frac{h}{2} \eta \quad (4.9)$$

em que  $\eta$  simboliza a refletividade radar por unidade de volume.

Para uma maior exatidão na derivação da equação radar, foi considerado por (Probert-Jones 1962) o caso de uma antena parabólica com seção transversal circular assumindo que, dentro do lóbulo principal, a potência por unidade de área pode ser representada por uma função Gaussiana, sendo esta aproximação satisfatória na maior parte dos casos. Assim, quando o feixe no seu todo é interceptado pelos alvos, a equação (4.9) pode reescrever-se da seguinte forma:

$$\bar{P}_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 \theta^2 h}{1024 \pi^2 \ln 2} \frac{\eta}{r^2}, \quad (4.10)$$

Por outro lado, a seção transversal de retrodifusão, caso se considere um elemento esférico de difusão e naturalmente mais pequeno quando comparado com o  $\lambda$  do radar, é dada por:

$$\sigma = 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 r_0^6, \quad \text{com } K = \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \text{ e } m = n - ik \quad (4.11)$$

em que  $m$  é o índice, complexo, de refração da esfera sendo  $n$  o índice de refatividade e  $k$  o coeficiente de absorção. Ou seja, as partículas que forem pequenas o suficiente, quando comparadas com o comprimento de onda do radar, podem ser consideradas como retrodifusores de *Rayleigh*.

No caso concreto do radar de banda C de CCL, com um  $\lambda$  de 5,32 cm, as gotas de chuva podem ser considerados como retro difusores de *Rayleigh*. Caso se considere um volume de gotas de chuva esféricas que se encontrem em movimento, por exemplo no seu trajeto descendente em direção à superfície, a potência média recebida pode ser escrita da seguinte forma

$$\bar{P}_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} 64 \frac{\pi^2}{\lambda^4} |K|^2 \sum r_0^6, \quad (4.12)$$

onde o somatório representa a soma no interior de todo o volume. A equação (4.12) pode ser reescrita em função dos diâmetros das gotas, ficando

$$\bar{P}_r = P_t \frac{G^2 \pi^2}{(4\pi)^3 r^4 \lambda^2} |K|^2 \sum D^6, \quad (4.13)$$

sendo que o fator  $\sum D^6$  é posteriormente substituído pela quantidade Z, definida por

$$Z = \sum_V D^6 = \int_0^\infty N(D) D^6 dD, \quad (4.14)$$

onde o fator  $\sum_V$  representa a soma por unidade de volume e  $N(D)dD$  é o número de retro difusores por unidade de volume com diâmetros D em dD.

Em suma, a potência média recebida na antena, é função de parâmetros intrínsecos ao radar meteorológico, da distância dos alvos à fonte emissora (r), do comprimento de onda da radiação de trabalho ( $\lambda$ ), das características da precipitação (K) e do fator refletividade radar (Z)

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G^2 \tau c \pi^3 \theta^2}{16 \cdot 64 \lambda^2 \ln 2} |K|^2 \frac{Z}{r^2}, \quad (4.15)$$

ou, simplesmente, a equação radar pode aparecer como,

$$\bar{P}_r = C |K|^2 \frac{Z}{r^2}, \quad (4.16)$$

com  $C$  uma constante e  $|K|^2$  a assumir valores aproximados de 0,93 para a água e 0,21 para o gelo.

Devido aos valores que a potência média recebida e o fator refletividade radar podem assumir (*e.g.* para  $Z = 100000$  temos o correspondente 50 dBZ) é útil reescrever a equação radar em versão logarítmica,

$$10 \log \bar{P}_r = 10 \log Z - 20 \log r + C, \quad (4.17)$$

em que  $Z$  medido em  $\text{mm}^6\text{m}^{-3}$  e na versão  $10 \log Z$  é medido em dBZ.

## 4.2 Relação entre o conteúdo em água líquida, a taxa de precipitação e o parâmetro $Z$

Em meados do século passado, ao longo de vários anos, foram realizados diversos estudos estatísticos que demonstraram uma relação entre o parâmetro  $Z$  e a intensidade da precipitação,  $R$ . Entre esses estudos, encontram-se também estudos estatísticos que relacionam o conteúdo em água líquida,  $LWC$ , e a taxa de precipitação. Por exemplo, as equações para a chuva estratiforme (Marshall e Palmer 1948) e granizo (por Douglas, 1964) são as seguintes:

$$LWC = 0,072R^{0,88}, \quad (4.18)$$

e

$$LWC = 0,018R^{0,97}, \quad (4.19)$$

respetivamente, sendo que as unidades de  $LWC$  são  $\text{gm}^{-3}$  e, de  $R$ ,  $\text{mmh}^{-1}$ .

No subcapítulo anterior, foi visto que, se as partículas de precipitação forem mais pequenas que o comprimento de onda de trabalho do radar, a potência média retro difundida é proporcional ao fator refletividade radar  $Z$ . Por outro lado, considerando a equação (4.14) e que  $LWC$  é representado por partículas com diâmetro  $D$  e densidade  $\rho$  temos

$$LWC = \frac{\pi}{6} \rho \sum D^3, \quad (4.20)$$

Se todas as partículas forem do mesmo tamanho numa unidade de volume,  $Z$  será igual a

$$Z = \frac{36}{\pi^2 \rho^2 N} LWC^2, \quad (4.21)$$

Estudos empíricos, demonstraram que  $Z$  é quase diretamente proporcional a  $LWC^2$ , sendo que na literatura são descritas, por exemplo, as seguintes expressões para as nuvens (Atlas 1954), partículas de precipitação em nuvens *cumululus congestus* (Brown e Braham 1963) e chuva (por Douglas, 1964),

$$Z = 4,8 * 10^{-2} LWC^{2,00}, \quad (4.22)$$

$$Z = 3,8 * 10^{-2} LWC^{1,46} , \quad (4.23)$$

$$Z = 2,4 * 10^4 LWC^{1,82} , \quad (4.24)$$

respetivamente, sendo LWC em  $gm^{-3}$  e Z em  $mm^6m^{-3}$ .

Com a finalidade de utilizar o radar meteorológico para estimar valores de intensidade de precipitação, tem-se utilizado a seguinte expressão empírica

$$Z = A R^b , \quad (4.25)$$

Os coeficientes  $A$  e  $b$  diferem de acordo com a localização geográfica e a distribuição média do tamanho das gotas no espaço e no tempo, o que implica a impossibilidade de definir uma relação universal que se possa aplicar a todos os tipos de precipitação. Estudos posteriores resultaram em dados e curvas de regressão que relacionaram, empiricamente, o parâmetros  $Z$  e  $R$ , obtendo expressões em função de cada tipo de precipitação: estratiforme (Marshall e Palmer 1948), orográfica (Blanchard 1953) e de origem convectiva (Jones 1956),

$$Z = 200 R^{1,60} , \quad (4.26)$$

$$Z = 31 R^{1,71} , \quad (4.27)$$

$$Z = 486 R^{1,37} , \quad (4.28)$$

respetivamente.

No IPMA, atualmente, está configurada a equação (4.26) para o processamento da intensidade de precipitação em função do fator refletividade. Em radares de polarização simples é utilizada unicamente esta relação, por razões intrínsecas à limitação da polarização, já que em radares de polarização dupla é possível recorrer a outras variáveis. Por exemplo, no radar de APG, encontra-se configurado operacionalmente a produção, de 5 em 5 minutos, do produto PCAPPI(R) que utiliza um algoritmo baseado em  $Z$  e na refletividade diferencial (ZDR). Para além do algoritmo  $R(Z, ZDR)$  existem outros como, por exemplo,  $R(KDP, ZDR)$  usando duas grandezas polarimétricas, ZDR e a fase diferencial específica (KDP), com objetivo idêntico de melhorar a estimativa da intensidade de precipitação.

### 4.3 Doppler e momento velocidade

A refletividade, a velocidade e a largura do espectro são momentos do espectro *doppler*, na qual representa a distribuição da potência recebida em função da velocidade *doppler*. No âmbito do presente trabalho não se utilizou o campo da velocidade, no entanto, importa realizar uma breve referência. Os radares meteorológicos *doppler* permitem obter informação sobre a localização dos alvos mas também sobre o seu movimento. Quando os impulsos de micro-ondas são transmitidos, o radar regista a sua frequência permitindo posteriormente, quando a radiação retro difundida por um alvo for recebida na antena, saber se existiu ou não mudança de frequência e, caso essa alteração tenha ocorrido, obter informação se o alvo se aproxima ou se desloca em relação ao radar e calcular a respetiva velocidade radial.

## 5. Área de estudo

A área de estudo considerada para o presente trabalho foi delimitada pelos vértices com as seguintes coordenadas: canto superior direito {38,80 N; 9,01 W} e canto inferior esquerdo {38,60 N; 9,52 W}. Esta região é definida por uma distância zonal de aproximadamente 44 km e uma distância meridional de aproximadamente 22 km o que corresponde a uma área de cerca de 968 km<sup>2</sup>. A área que é ilustrada em destaque na Figura 5.1 compreende a região sul da Grande Lisboa e parte noroeste da Península de Setúbal, englobando uma grande densidade populacional e, portanto, de maior interesse em termos de previsão no que respeita a salvaguarda de vidas e bens. Do ângulo da potencial informação meteorológica a ser usada, reside nesta área uma densidade elevada de estações meteorológicas automáticas e está disponível informação GPS proveniente de 5 recetores. O radar de CCL encontra-se a aproximadamente a 85 km em linha reta do centro da área de estudo.

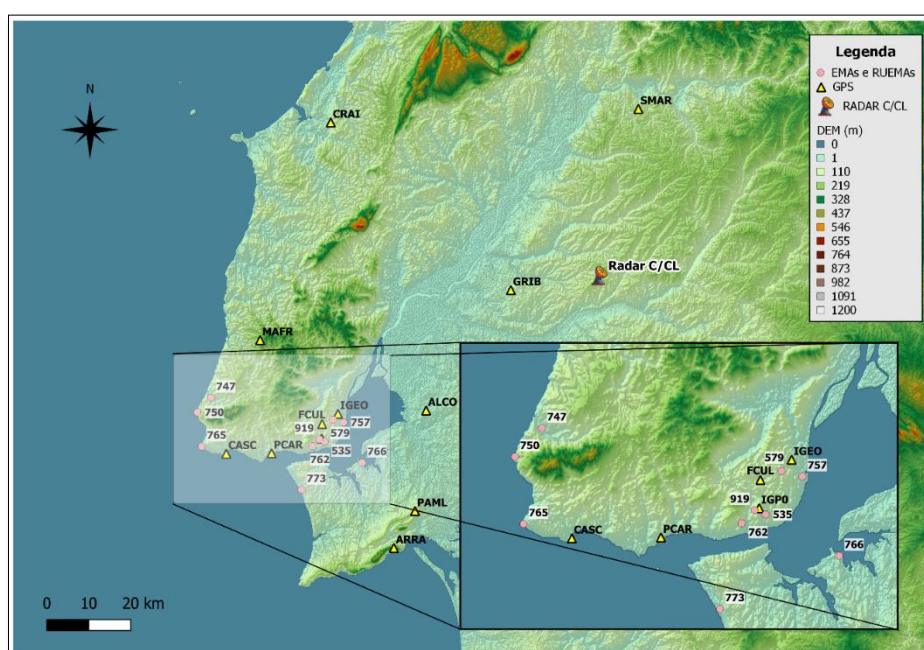


Figura 5.1 – Área de estudo em destaque e identificação do radar meteorológico de CCL, das estações GPS e das estações meteorológicas automáticas. O modelo digital do terreno foi baseado em ((CGIAR-CSI) 2004-2022).

### 5.1 Contaminação da informação radar

Se se considerar uma perspetiva meramente orográfica, a área de estudo é observada, tendo em conta a elevação mais baixa do rastreio operacional da refletividade do radar de CCL (0,1°), a altitudes entre os 600 m, na região NE e os 1100 m na região SW. Na Figura 5.2 pode ser observada uma visão geral, com recurso a uma ferramenta fornecida pela *Cambridge Pixel* para o cálculo da cobertura radar, com informação da altitude a que é realizada a observação em função das características radar. No presente caso, foi configurada com a seguinte informação de *input*: i) coordenadas radar {39,07137 N, 8,39888 W}; ii) altura do feixe da antena acima do solo a 20 m; iii) elevação mais baixa de 0,1° e a mais alta 2,9°, a que corresponde o sub-rastreio das primeiras 4 elevações do rastreio da refletividade (falado com maior destaque nos subcapítulos 6.3 e 7.4); iv) alcance horizontal de 150 km; e v) considerando a curvatura da Terra. Para a *output* no campo de observação em altura foram considerados os seguintes intervalos: 0, 100, 500, 750, 1000, 1500 e 2000 m.

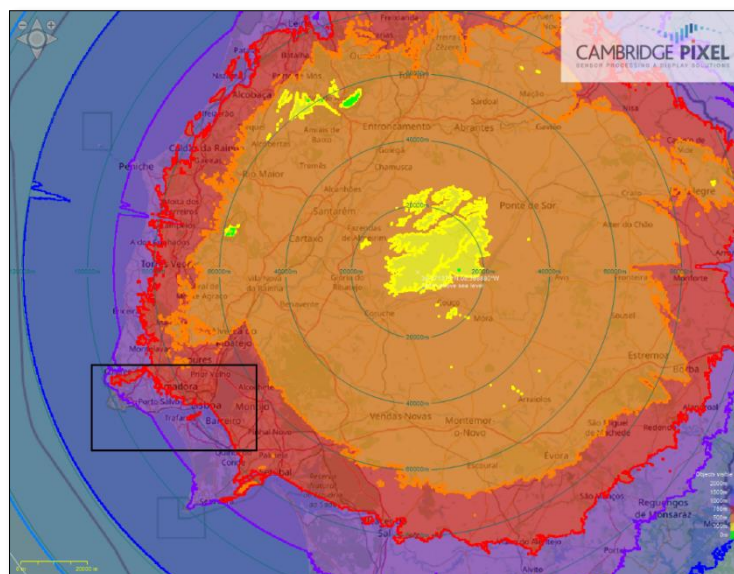


Figura 5.2 – Cobertura do radar de CCL considerando um rastreamento com um ângulo mínimo de  $0,1^\circ$  e máximo de  $2,9^\circ$ , com a área em estudo delimitada pelo retângulo a preto (software *Cambridge Pixel*, 2022).

Contudo, é comum o aparecimento nas imagens radar de ecos não meteorológicos e de interferências, denominados de *clutter*. Considerando, na ótica da meteorologia radar, que a maior parte dos fenómenos meteorológicos de interesse ocorrem nas camadas mais baixas da troposfera, é importante uma breve descrição sobre o aparecimento de informação espúria nas imagens radar. Este tipo de contaminação tem, na sua maioria, origem em diferentes fontes exteriores ao sistema radar e, por conseguinte, constituem diferentes tipos de interferência, podendo ser divididos em vários grupos, como por exemplo, *clutter* de superfície e *clutter* atmosférico.

O sinal retro difundido de aviões e de alvos biológicos, como pássaros e insetos constituem exemplos de *clutter* atmosférico. As anomalias nas imagens radar produzidas por sinais de rádio, conhecidas por *Radio Local Area Network* (RLAN) ou os *sun spikes* constituem um tipo diferente de *clutter* relacionado com interferências na região das micro-ondas do espectro eletromagnético.

Relativamente ao *clutter* de superfície, este pode ainda ser subdividido em i) *clutter* de solo, onde se incluem todas as construções realizadas pelo homem, como torres, edifícios, antenas, parques eólicos, etc., e as resultantes do meio natural, como por exemplo, montanhas e/ou cordilheiras; ii) *clutter* de mar, resultante da radiação retro difundida pela superfície de mar em condições em que a(s) primeira(s) elevação(ões), por questões relacionadas com a propagação anómala, é conduzida para altitudes inferiores.

Um dos *clutters* de solo que mais interfere com a operacionalidade dos radares meteorológicos deriva da presença de parques eólicos na área geográfica coberta pela observação radar. Na Figura 5.3 (a), identifica-se a localização geográfica dos parques eólicos mais próximos do radar de CCL e que podem, eventualmente, acrescentar informação não meteorológica aos produtos radar, como é ilustrado no exemplo da Figura 5.3 (b) através do produto de precipitação acumulada, em 6h, das 23 UTC de dia 29 de agosto de 2022, sem que tenha sido registada precipitação nas seis horas anteriores na região em destaque no mapa.

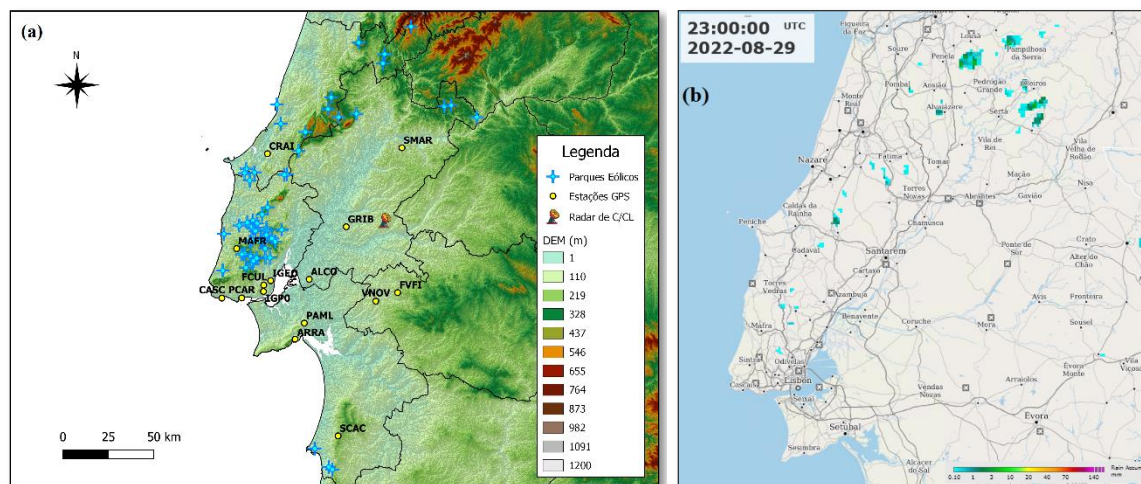
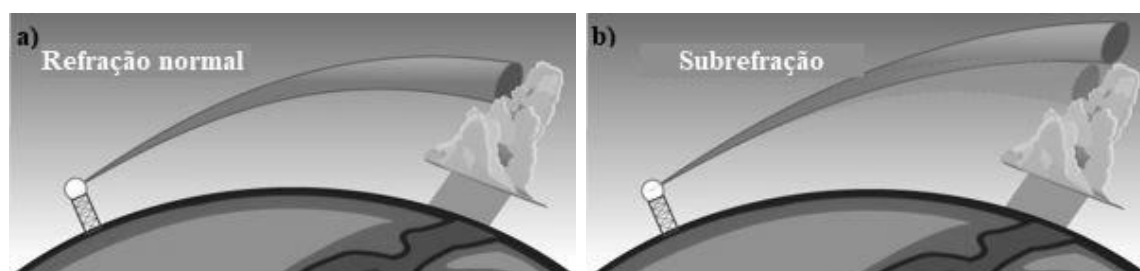


Figura 5.3 – (a) Mapa com identificação geográfica dos parques eólicos, das estações de GPS e do radar meteorológico de C/CL, e (b) Produto de precipitação acumulada em 6h, das 23 UTC de dia 29 de agosto de 2022, do radar de C/CL.

Os parques eólicos, num total de 62, distribuem-se pelos distritos de Beja (2), Leiria (12), Lisboa (39), Portalegre (1), Santarém (5) e Setúbal (3). Caso a área de estudo abrangesse a localização de parques eólicos seria necessário a remoção dos pixéis radar correspondentes às localizações geográficas dos geradores eólicos. Esta filtragem seria fundamental para a informação espúria gerada pelo movimento das pás de cada um dos geradores eólicos não contaminasse a informação observada pelo radar e posteriormente analisada do ponto de vista de refletividade e/ou precipitação. Se se tratasse de ecos meramente fixos poder-se-ia utilizar uma filtragem de remoção do sinal para minorar esta situação, contudo o movimento das pás, seja na intensidade de rotação seja na sua orientação, dos geradores eólicos provocam uma interpretação no radar de que se trata de objetos em movimento.

O *clutter* de mar resulta basicamente da interação do feixe radar com o *spray* marítimo quando o mar se apresenta com alguma agitação marítima. Situações de propagação anómala aumentam em muito o aparecimento de *clutter* de mar nas imagens radar. Este tipo de *clutter* tem também implicações no campo *doppler* porque a superfície de mar acaba por ser interpretada como possuindo alvos em movimento.

O comportamento da propagação da radiação emitida pelo radar na atmosfera depende, essencialmente, da distribuição vertical da temperatura e da humidade do ar. Por sua vez, o gradiente vertical do índice de refração será influenciado pela variação vertical destas duas grandezas. No caso de índices de refração normais o feixe radar percorrerá o volume observado em condições de propagação normais (Figura 5.4, a)). Contudo, se a estrutura vertical da atmosfera apresentar gradientes de temperatura e humidade e, por conseguinte, de densidade, diferentes da atmosfera padrão o feixe radar sofrerá uma propagação anómala. Este tipo de propagação pode ser ramificado em 3 situações distintas.



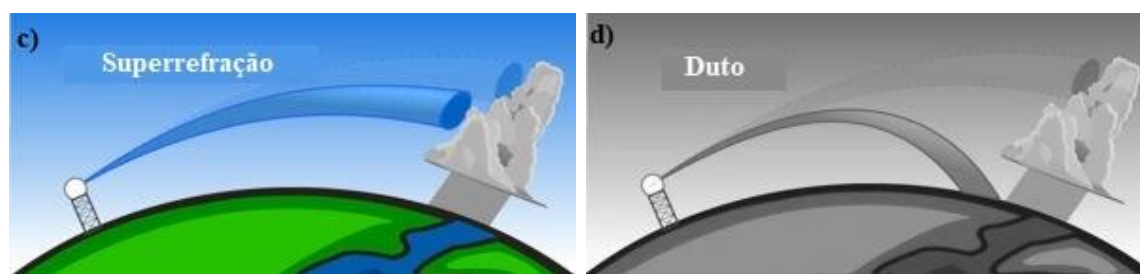


Figura 5.4 – Propagação do feixe radar sob condições de a) refração normal, b) subrefração, c) superrefração e d) duto (adaptado de *National Weather Service, NOAA, 2022*).

O caso em que a diminuição da densidade com a altitude for maior do que o normal, o feixe radar encurva menos que o normal e o feixe subirá excessivamente, a que corresponde uma situação de subrefração (Figura 5.4(b)). Por outro lado, se a diminuição da densidade com a altitude é menor que o normal, o feixe radar curvará mais que o normal e em direção à superfície da terra (Figura 5.4(c)). Por último, a situação de duto, que corresponde a uma situação mais extrema de superrefração e que obriga o feixe radar a desenvolver uma trajetória com curvatura superior à curvatura da terra (Figura 5.4(d)), originando ecos falsos nas imagens radar. Inversões de temperatura durante a noite e circulações de brisa de mar, que transporta ar com elevado conteúdo em humidade sobre ar mais seco continental, são exemplos de situações meteorológicas que favorecem a ocorrência de propagação anómala de superrefração e, por conseguinte, o favorecimento no aparecimento de *clutter* de mar. Contudo, é perfeitamente identificável para posterior filtragem, pois manifesta-se nas elevações mais baixas, com valores de refletividade baixos e existindo persistência geográfica.

Os RLANs resultam da contaminação das imagens radar por sinais de rádio que utilizam a frequência de trabalho do radar. Na imagem da Figura 5.5 (a), temos um exemplo da presença de *clutter* de mar e de um RLAN com azimute aproximado de 193° e que afeta a região da Península de Setúbal com origem num radar mais distante que o de CCL, neste caso o de APG. Esta situação mereceria atenção caso se estivesse a utilizar informação radar em formato mosaico. Na Figura 5.5 (b) apresenta-se um exemplo de *clutter* de mar, a aparecer em várias zonas ao longo da costa ocidental portuguesa e, em particular, a oeste e sudoeste da região da Grande Lisboa resultante das elevações mais baixas do radar de CCL.

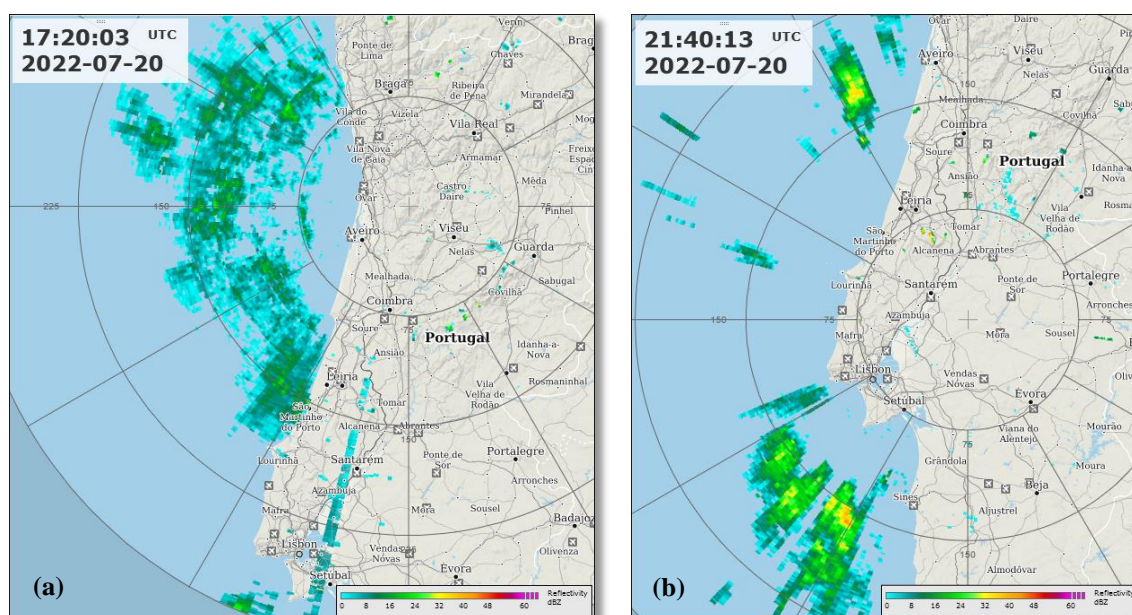


Figura 5.5 – (a) Produto MAX(Z) das 1720 UTC do radar de APG e (b) produto MAX(Z) das 2140 UTC do radar de CCL, ambos de dia 20 de julho de 2022.

Contudo, mesmo considerando a área de estudo sem interferência da coexistência de parques eólicos e sem informação proveniente de *clutter* de mar, existem ainda alguns constrangimentos do ponto de vista da informação radar, em concreto, pela razão de as observações se realizarem sobre uma área urbana. Em ambientes urbanos a existência de *clutter* pode ter origem em múltiplas fontes, como por exemplo, edifícios de maior magnitude, pontes, aeroportos e interferências provenientes de sistemas de telecomunicações. Como exemplo, é ilustrada na carta de prognóstico da Figura 5.6 uma situação sinóptica caracterizada pela típica passagem de uma frente fria associada a uma depressão frontal localizada a oeste da Península Ibérica, neste caso, aproximadamente às 12 UTC pela região de Lisboa e, posteriormente, pela passagem de algumas linhas de instabilidade também eles associadas à circulação da referida depressão. Recorrendo ao produto radar indicador de posição plana (PPI) com base na elevação mais baixa ( $0,1^\circ$ ) do rastreio operacional do radar de CCL, é possível identificar às 1150 UTC a passagem da superfície frontal fria (Figura 5.7). Na Figura 5.7 (a) temos um exemplo de uma imagem da refletividade não corrigida, ou seja, da refletividade total (dBZ) e na Figura 5.7 (b) a imagem da refletividade corrigida (dBZ) após a remoção do *clutter*, resultantes do mesmo rastreio. A zona urbana de Lisboa representa um bom exemplo para ilustrar a possibilidade de remover inadvertidamente algum sinal meteorológico que possa contribuir para o correto campo da refletividade e posteriores estimativas hidrológicas como produtos de intensidade de precipitação ou precipitação acumulada em diferentes períodos.

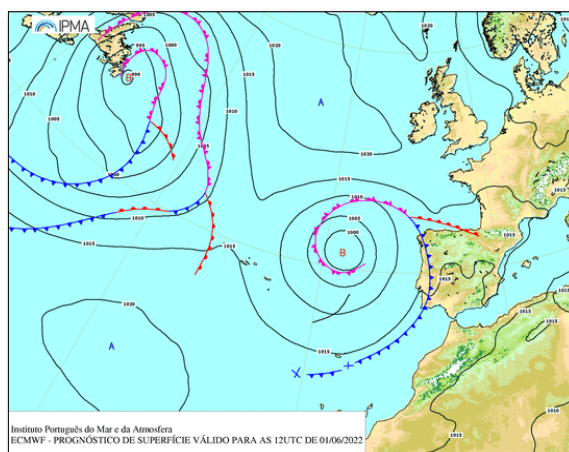


Figura 5.6 – Carta de prognóstico de superfície para as 12 UTC de dia 1 de junho de 2022 (IPMA).

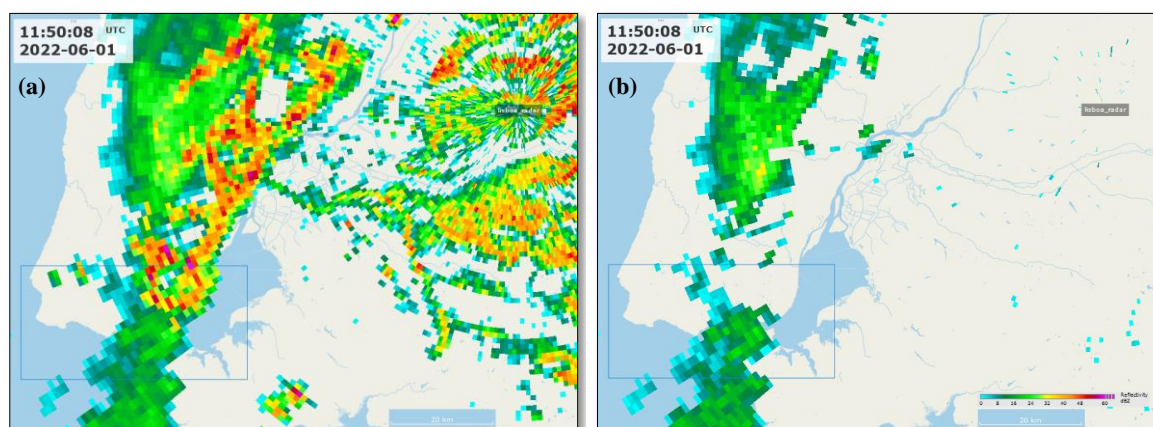


Figura 5.7 – (a) Imagem do produto PPI, das 1150 UTC de 1 de junho de 2022, da refletividade total e (b) da refletividade corrigida, da elevação  $0,1^\circ$  do radar de CCL. A área de estudo está delimitada por um retângulo a azul e a localização do radar pela etiqueta 'lisboa\_radar'.

A remoção deste tipo de *clutter* é realizada por configuração de uma filtragem baseada nos parâmetros *signal-to-noise ratio* (LOG) e *clutter-to-signal ratio* (CSR), sendo que os valores configurados dependem do tipo de rastreios. Na Figura 5.8 exemplo da configuração para o sub-rastreio REFLECTVOL\_A a que corresponde as primeiras quatro elevações do rastreio da refletividade do radar de CCL. De referir que nos radares de polarização dupla é utilizado um terceiro parâmetro (coluna sombreada na Figura 5.8) de nome *polarimetric meteo index* (PMI).

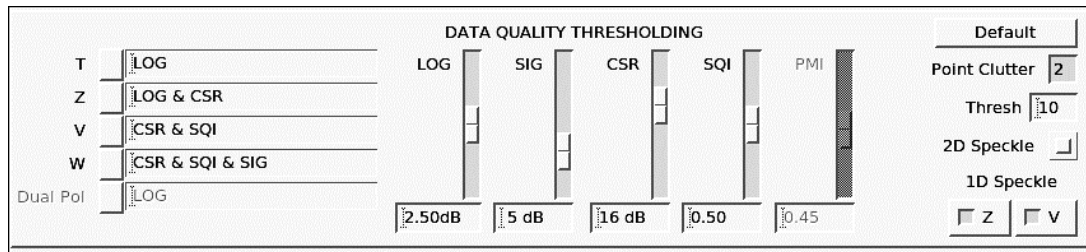


Figura 5.8 – Menu de configuração da qualidade dos dados para o sub-rastreio da refletividade, a que correspondem as primeiras 4 elevações, do radar de CCL.

## 6. Sensores e estações – características e dados

Os sensores utilizados no presente estudo pertencem a várias entidades. As estações meteorológicas automáticas integram a rede de observação de superfície do Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Os recetores GNSS derivam de redes de três entidades distintas: a) Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP) da Direção Geral do Território (dgT); b) Sistema de Estações de Referência GNSS VIRTuais (SERVIR) do Centro de Informação Geoespacial do Exército (IGEOE) e c) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. O radar meteorológico de CCL, como mencionado no capítulo 4, integra a rede operacional de estações radar do IPMA. A Figura 6.1 mostra a distribuição geográfica das várias estações/recetores com destaque sobre a área de maior densidade, com as EMAs principais (doravante, tipo I) a vermelho, as EMAs climatológicas (doravante, tipo II) a castanho, as RUEMAs a cor-de-rosa, os recetores GNSS a amarelo, a área de cobertura radar (limitada na figura a 150 km) sobre um mapa com um modelo digital do terreno com as zonas mais escuras a corresponder a altitudes mais elevadas e as mais claras a zonas de altitudes mais baixas. A localização da estação de radiossondagem, à data, coincide com a da estação meteorológica automática 579.

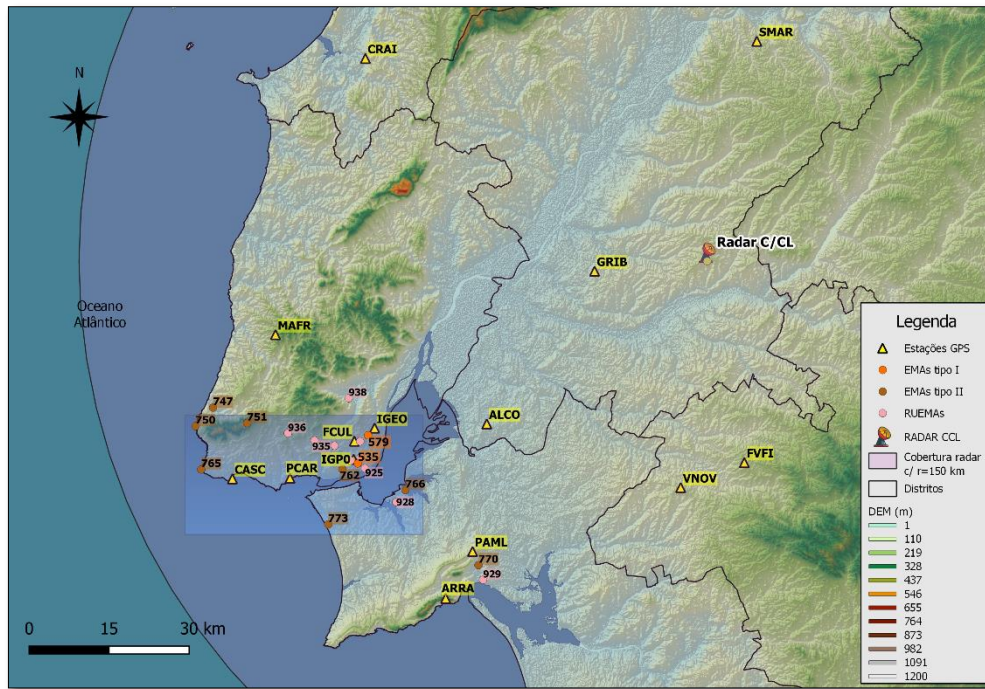


Figura 6.1 – Mapa com a identificação das estações automáticas distinguidas pelo seu tipo, estações GPS, estação de radiossondagem, área de estudo e cobertura radar ( $r = 150$  km) (Modelo Digital do Terreno, <https://srtm.csi.cgiar.org/>).

## 6.1 Estações meteorológicas automáticas

No presente trabalho foram utilizadas estações meteorológicas automáticas da rede de observação de superfície do IPMA. Estas estações, que se encontram identificadas no mapa da Figura 6.1, constituem três grupos: estações meteorológicas automáticas: i) principais (tipo I), que normalmente são co-operadas por observadores meteorológicos, permitindo por exemplo a codificação de observações visuais, e dispõem da maioria dos sensores (abrigo de temperatura e humidade relativa ou termo-higrómetro situados a 1,5 m, psicrómetro, barómetro, anemómetro e catavento ou sensor ultrassónico situados a 10 m, udómetro, evaporímetro, detetor de precipitação, piranómetro, termómetros de relva (+5 cm) e profundidade (-5, -10, -20, -50 e -100 cm)); ii) climatológicas (tipo II), são estações semelhantes à do tipo I mas, por exemplo, não dispõem de sensor de pressão (a estação de Cabo Raso é exceção); e iii) urbana (RUEMA), estações que são instaladas na malha urbana, não seguindo necessariamente todas as condições de instalação e dispõem de menos sensores quando comparadas com as principais e climatológicas. Contudo, todas as estações dispõem de um udómetro que é o sensor utilizado para quantificar a precipitação no seu estado líquido em função de um intervalo de tempo pré-definido. O IPMA disponibiliza os dados das estações automáticas em formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) e, em particular, a precipitação, em mm, em intervalos de 10 minutos, de 1 hora e diários, sendo que foi utilizada informação horária.

Na Tabela 6.1 encontra-se informação sobre as estações (EMAs (I e II) e RUEMAs), nomeadamente o nome, o número, o tipo, as coordenadas geográficas (latitude/longitude) e a altitude a que estão instaladas.

Tabela 6.1 – Lista das EMAs (I e II) e RUEMAs.

Nome da Estação	n.º	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Lisboa / Geofísico	535	EMA I	38,7191	-9,1497	77
Lisboa / Gago Coutinho	579	“	38,7662	-9,1275	104
Colares	747	EMA II	38,8126	-9,4600	25
Cabo da Roca *	750	“	38,7816	-9,4975	141
Sintra / Pena	751	“	38,7867	-9,3868	464
Lisboa / Tapada da Ajuda	762	“	38,7096	-9,1828	62
Cabo Raso / Farol	765	“	38,7090	-9,4854	9
Barreiro / Lavradio	766	“	38,6745	-9,0476	6
Setúbal / Estação Fruticultura	770	“	38,5485	-8,8908	35
Almada / Praia da Rainha	773	“	38,6170	-9,2129	7
Lisboa / Amoreiras / Liceu Francês <sup>+</sup>	919	RUEMA	38,7239	-9,1649	98
Lisboa / Alvalade	921	“	38,7561	-9,1446	90
Lisboa / Estefânia	924	“	38,7295	-9,1433	79
Lisboa / Baixa	925	“	38,7109	-9,1341	8
Barreiro	928	“	38,6544	-9,0672	15
Setúbal	929	“	38,5239	-8,8810	32
Lisboa / Benfica	931	“	38,7489	-9,1995	75
Amadora	935	“	38,7576	-9,2424	143
Cacém	936	“	38,7696	-9,2995	124
Loures	938	“	38,8285	-9,1693	41

\* Início de funcionamento a 9 de maio de 2012. <sup>+</sup> Início de funcionamento a 28 de março de 2012.

<sup>~</sup> Localizada no exterior da área de estudo.

### 6.1.1 Radiossondagem

Os dados utilizados de observação em altitude, em particular os dados de água precipitável total (TPW) são provenientes das radiossondagens realizadas na estação de Gago Coutinho (579), localizada na periferia do aeroporto de Lisboa. O parâmetro TPW, em mm (ou  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), permite fornecer uma quantidade de vapor de água presente na atmosfera, sendo que a maior parte da sua concentração se situa na camada entre a superfície e os 3000 m. Assumindo uma coluna vertical, entre a superfície e o topo da atmosfera, com uma base de  $1 \text{ m}^2$ , o TPW seria igual ao conteúdo em água líquida nessa coluna se todo o vapor de água condensasse. A equação para o seu cálculo pode ser expressa em

$$TPW = \frac{1}{\rho_w g} \int_{p_{sup}}^0 q(p) \cdot dp, \quad (6.1)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água (em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade (em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $q(p)$  é a razão de mistura (em  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) do vapor de água no nível de pressão  $p$  e  $p_{sup}$  a pressão à superfície (em hPa) (EUMetrain 2014).

## 6.2 GPS

Como mencionado no início do capítulo 6, os recetores terrestres de GNSS pertencem a três redes. A ReNEP, disponibilizada pela dgT, constituída por estações GPS/GNSS, de observação contínua,

que difundem observações no sistema de referência ETRS89<sup>1</sup> para o continente (dgT, Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS 2022). A rede SERVIR, disponibilizada pelo IGEOE, consiste, igualmente, num conjunto de estações de referência permanente de observação GNSS utilizando o referencial ITRF 2008 (EPSG:5332) (CIGeoE 2013). Ambas as instituições fornecem a informação em pós-processamento no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX). A Faculdade de Ciências dispõe de um sensor instalado no campus da faculdade. Na Tabela 6.2, está disponível a informação sobre algumas das características dos sensores de GPS.

Tabela 6.2 – Lista dos recetores GPS.

Sensor (nome)	Código	Rede	Dados (Constelação de Satélites)	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude Elipsoidal <sup>2</sup> (m)
Alcochete	ALCO*	IGEOE	GPS + GLONASS + SBAS <sup>3</sup>	38,7853	-8,8729	85,966
Arrábida	ARRA	IGEOE	GPS + GLONASS + SBAS	38,4928	-8,9611	409,649
<b>Cascais</b>	<b>CASC</b>	<b>DGT</b>	GPS+GLONASS+GALILEO	38,6934	-9,4185	76,020
Caldas da Rainha	CRAI	IGEOE	GPS + GLONASS + SBAS	39,3942	-9,1332	121,078
<b>Faculdade de Ciências</b>	<b>FCUL</b>	<b>FCUL</b>	GPS	38,7565	-9,1569	155,531
Foros de Vale Figueira	FVFI	DGT	GPS + GLONASS	38,7205	-8,3205	237,562
Glória Ribatejo	GRIB	DGT	GPS + GLONASS	39,0405	-8,6417	135,875
<b>Instituto Geográfico Lisboa</b>	<b>IGEO</b>	<b>IGEOE</b>		38,7783	-9,1136	133,100
	<b>IGP0</b>	<b>DGT</b>	GPS + GLONASS	38,7260	-9,1585	178,827
Mafra	MAFR	IGEOE	GPS + GLONASS + SBAS	38,9345	-9,3261	306,423
Palmela	PAML	DGT	GPS + GLONASS	38,5715	-8,9034	246,016
<b>Paço de Arcos</b>	<b>PCAR</b>	<b>IGEOE</b>	GPS + GLONASS + SBAS	38,6943	-9,2949	75,749
Santiago Cacém	SCAC	DGT	GPS + GLONASS	38,0188	-8,6926	277,005
Santa Margarida	SMAR	IGEOE	GPS + GLONASS + SBAS	39,4228	-8,2937	212,318
Vendas Novas	VNOV	IGEOE	GPS + GLONASS + SBAS	38,6786	-8,4570	220,115

\* Sem informação disponível.

As estações GPS utilizadas na área de estudo para comparação com a informação radar encontram-se destacadas a negrito.

Recuperando o conteúdo da Figura 3.4, o cálculo até à obtenção do PWV pode ser representado de forma resumida no fluxograma da Figura 6.2.

<sup>1</sup> ETRS89 é um sistema global de referência recomendado pela EUREF (*European Reference Frame*, subcomissão da IAG - Associação Internacional de Geodesia) (dgT, PT-TM06/ETRS89 2022).

<sup>2</sup> Dados de 2012.

<sup>3</sup> SBAS são sistemas regionais, como por exemplo o EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), que permitem melhorar a performance dos GNSS (EUSPA 2022).

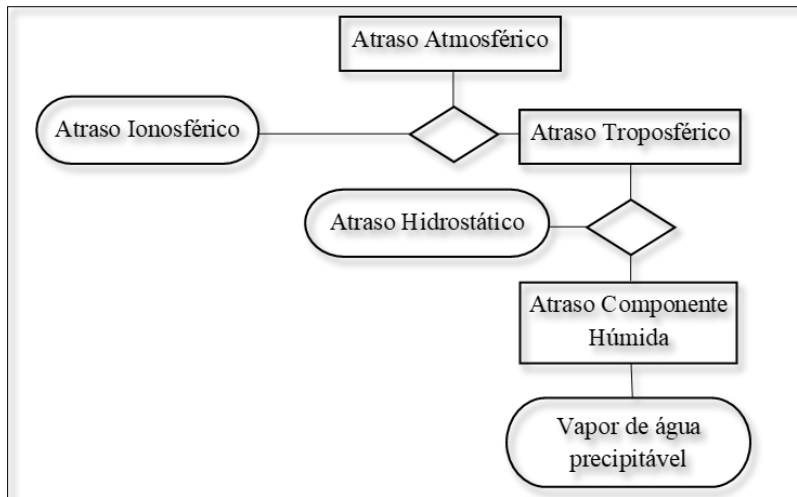


Figura 6.2 – Fluxograma para o cálculo do PWV.

O atraso atmosférico é separado nas componentes ionosférica e troposférica. Por sua vez, a componente troposférica zenital (ZTD) pode ser decomposta nas componentes hidrostática zenital (ZHD) (componente seca) e na componente húmida zenital (ZWD). A componente seca da refratividade, de um modo geral, representa mais do que 90% do atraso troposférico total e pode ser determinada com grande precisão a partir de medições da pressão atmosférica, considerando um bom modelo e ausência de erros na medição da pressão (Mendes 2022). A componente húmida, embora represente menos do que 10%, contribui com um maior erro, devido ao carácter variável do vapor de água na atmosfera, tornando difícil a sua modelação. Contudo, sobre esta última componente, é utilizada a relação empírica (equação 3.2) proposta por (Bevis, Businger e Herring, et al. 1992) para a estimativa do vapor de água precipitável (PWV) em função do ZWD.

Importa mencionar que a área de estudo não dispõe de qualquer tipo de fronteiras para que se possa considerar um sistema fechado, o que possibilita as trocas de massa com as regiões vizinhas da atmosfera. O diagrama ilustrado na Figura 6.3 mostra os cinco processos que desempenham um papel direto na quantidade de água presente na atmosfera sobre uma determinada região, a saber: evaporação local, precipitação local, fluxos de entrada e saída de vapor de água transportados pelo campo do vento horizontal e a capacidade de retenção de água pela própria atmosfera (Li 2018). Estes processos estão relacionados com outros processos indiretos, como por exemplo, a evaporação local é afetada pela temperatura à superfície e a precipitação local relacionada com a atividade convectiva.

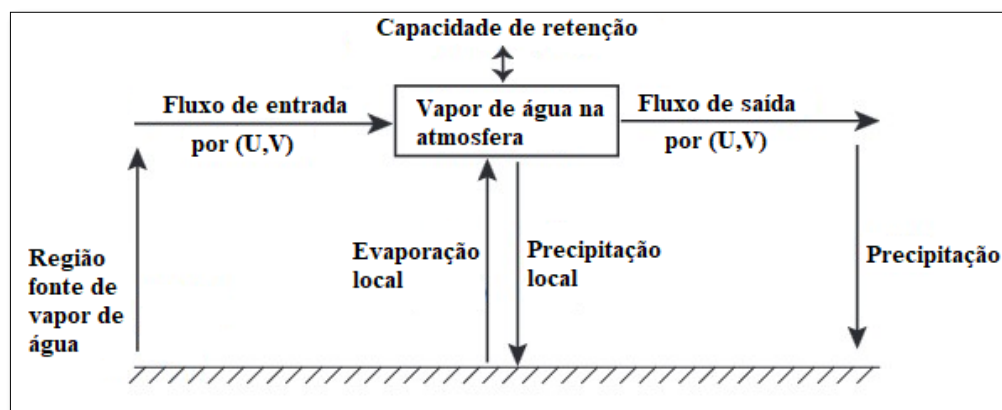


Figura 6.3 – Diagrama esquemático dos fatores que afetam a quantidade de vapor de água na atmosfera (adaptado de (Li 2018)).

Como referido anteriormente, das várias redes GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, etc.) utilizaram-se exclusivamente dados da rede GPS, provenientes dos sensores identificados na Tabela 6.2, e os dados utilizados de PWV foram calculados com uma frequência temporal de 15 minutos.

Na Figura 6.4, dois exemplos dos recetores GPS, IPG0 (a) e CASC (b).

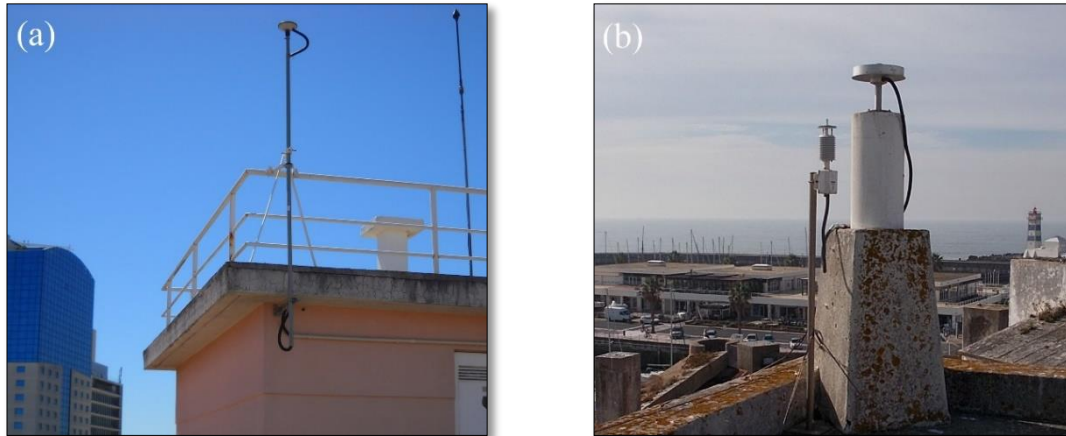


Figura 6.4 – Fotografias dos sensores (a) IPG0 e (b) CASC (dgT, Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS 2022).

### 6.3 Radar

Em função da área de estudo, definida no capítulo 5, foi utilizada informação volumétrica resultante dos rastreios operacionais realizados pelo radar de CCL durante o ano de 2012. Na Tabela 6.3 constam as principais características do radar meteorológico de CCL.

Tabela 6.3 – Características gerais do radar de CCL.

Radar de CCL	
Código WMO	08 550
Latitude	39° 04' 17'' N
Longitude	08° 23' 56'' W
Altitude do emissor	193 m
Empresa	<i>Gematronik</i>
Modelo	METEOR 360 AC
Tipo de Antena	Parabólica, 4.20 m
Ganho da Antena	45,31 dBi
Largura do Feixe	0,95°
Polarização	Linear, horizontal
Emissor	Magnetron
Modulador	Tiratron
Frequência / Banda	5640 MHz / C
Comprimento de onda	5,32 cm
Largura de Impulso	1,99/0,86 ms
PRF	250/1200 Hz



Figura 6.5 – Imagem da Estação Radar de CCL.

O radar meteorológico emite impulsos de energia na região das micro-ondas do espectro eletromagnético. A emissão deste tipo de radiação, que se desloca à velocidade da luz, e receção de uma parte da energia que foi retro difundida em direção à antena, possibilita a deteção de objetos que

se encontram a determinadas distâncias, sem perturbação do meio envolvente, razão pela qual o radar meteorológico é caracterizado como um sensor de observação remota. Como mencionado no subcapítulo 4.1.2, a potência média recebida na antena é posteriormente convertida no parâmetro refletividade radar.

O radar de CCL está configurado com uma estratégia operacional de rastreio direcionada para os campos da refletividade radar e do campo do vento e que cobre todos os sectores azimutais. No primeiro, o alcance horizontal é de 300 km e é constituído por 14 elevações compreendidas entre 0,1° e 19,5°. No campo do vento, o alcance horizontal é de 100 km e é constituído por 6 elevações compreendidas entre 0,1° e os 28,0° (Tabela 6.4).

Tabela 6.4 – Estratégia operacional do radar de CCL.

Nome sub-rastreio	Elevações (°)					
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>
REFELCTVOL_A	0,1	0,9	1,9	2,9	-	-
REFLECTVOL_B	3,9	4,9	5,9	7,2	-	-
REFLECTVOL_C	8,5	9,8	11,8	13,8	16,5	19,5
REFLECTSRI_A	0,1	0,9	1,9	2,9	-	-
VENTO	0,1	1,5	4,0	10,0	16,0	28,0

Para ambos os campos, a frequência temporal é de 10 minutos, contudo, para se dispor de uma disponibilidade maior para os campos hidrológicos, como a intensidade de precipitação e de mais valores de integração para o cálculo de precipitação acumulada, para diferentes intervalos, o rastreio REFLECTVOL\_A está duplicado, com o nome de REFLECTSRI\_A, sendo executado ao minuto 5 de 10 em 10 minutos.

Os dados do radar de CCL foram utilizados com base em ficheiros volumétricos construídos a partir do rastreio operacional e os produtos foram processados em função de diferentes elevações.

O processo para a obtenção da informação radar está descrito nos seguintes 4 pontos.

⊕ Extração, da base de dados radar, dos ficheiros *raw data* do ano de 2012, correspondentes aos ficheiros volumétricos necessários para a produção dos produtos 2D, como primeiro passo.

⊕ Em seguida, foram configurados e produzidos, para diversos períodos de tempo, os seguintes produtos radar: *Pseudo Constant Altitude Plane Position Indicator* para a precipitação (PCAPPI(R)) e *Surface Rainfall Intensity* (SRI), utilizados como produtos de base para a geração de outros radar, e precipitação acumulada em 1 hora (RAIN1) e máximos de refletividade MAX(Z)) como produtos finais.

⊕ O formato dos ficheiros destes produtos é um formato interno, binário, reconhecido pelo *software* radar, que no caso do radar de CCL, é o *Interactive Radar Information System* (IRIS), pelo que foi necessário proceder a uma conversão de formatos para facilitar a sua leitura e posterior processamento dos dados. A projeção natural, e considerada *standard*, para a visualização das imagens radar é a azimutal equidistante (AED). Esta projeção, utilizada pelo IPMA para ilustrar e visualizar a maioria dos produtos radar, exceto se se tratar de produtos compósitos que são refletidos em imagens mosaico, apresenta linhas de azimute como segmentos de reta, sendo que os ângulos não sofrem qualquer distorção, e os círculos concêntricos significam linhas de igual distância ao radar. Tipicamente, a origem da projeção é configurada com as coordenadas geográficas da estação radar. Para uma análise *pixel a pixel* da informação radar foi realizada uma conversão entre a projeção AED e a projeção geográfica (latitude/longitude).

⊕ Posteriormente, a informação foi truncada à área de estudo e extraídos os dados para cada *timestamp*.

## 7. Análise de dados

Antes da análise individual e comparativa dos dados de PWV, TPW, estações automáticas e radar, importa referir que o ano de 2012 em Portugal Continental caracterizou-se por uma situação de seca meteorológica, que se iniciou no final de 2011 e que se manteve durante quase o todo o ano de 2012 (IPMA 2012). O boletim climatológico afirma ainda que nesse ano ocorreram quatro ondas de calor e verificou-se um valor de precipitação total anual de 636 mm a que corresponde um desvio negativo de 246,1 mm em relação ao valor normal 1971-2000, o que permitiu classificar 2012 como um ano seco. No histograma da Figura 7.1 os primeiros três meses do ano, que foram classificados como secos a extremamente secos, destacam-se com valores de precipitação muito abaixo aos normais, contribuindo para que o valor anual de precipitação de 2012 fosse inferior ao normal.

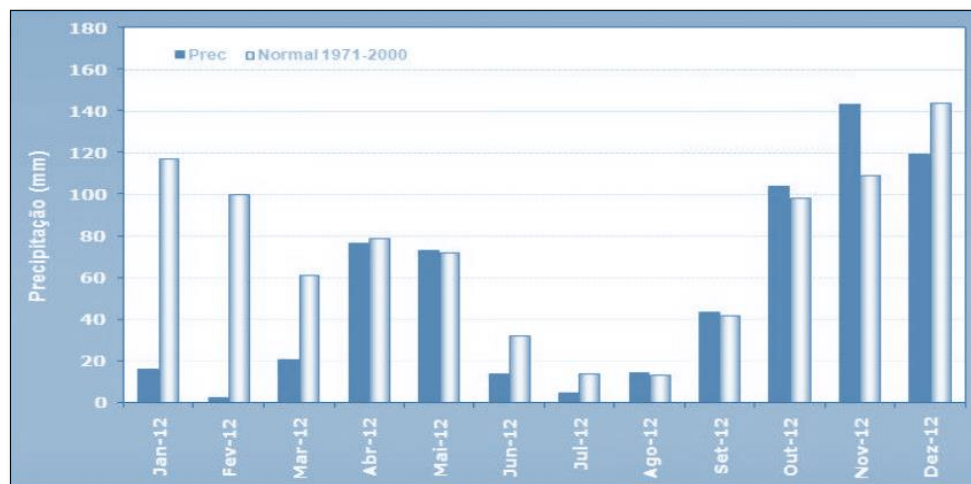


Figura 7.1 – Desvios do total de precipitação mensal em 2012 em relação ao valor normal 1971-2000 em Portugal Continental (adaptado de (IPMA 2012)).

Por conseguinte, o ano em estudo foi caracterizado por precipitação abaixo da média o que limitou a análise de episódios de precipitação.

### 7.1 Dados radar – precipitação

Uma das grandes vantagens do radar meteorológico em relação aos udómetros é a sua capacidade espacial, permitindo observações em área que as observações pontuais, do ponto de vista geográfico, da rede udométrica não permitem registar. Contudo, a informação proveniente das estações de superfície representam o *ground truth measurement* e, com o intuito de melhorar a estimativa do campo da precipitação, aplicam-se técnicas de ajustamento radar-udómetro, incorporando ambos os tipos de informação, como são exemplo os estudos de (Narciso, et al. 2016) e (Barbosa, Silva e Narciso 2018).

Foi realizada uma avaliação do campo da precipitação e comparada com informação udométrica das estações de superfície. Assim, para a totalidade do ano de 2012, foram produzidos de 5 em 5 minutos

com base nas primeiras 4 elevações, a que correspondem o primeiro e quarto sub-rastreios da Tabela 6.4, cerca de 104500 ficheiros do produto SRI. Estes foram utilizados, posteriormente, como *input* para a produção do produto RAIN1, para estimar a precipitação horária que, potencialmente, precipitou à superfície. O produto SRI foi configurado com os seguintes parâmetros: i) alcance horizontal de 150 km; ii) altitude de referência de 0,2 km; iii) altitude máxima livre de *clutter* de 3 km; iv) relação R(Z); v) altitude da isotérmica zero não fixa; e vi) distinção entre tipos de precipitação selecionado. O produto RAIN1 foi configurado para um período de 60 minutos, a que corresponde uma integração teórica de 12 produtos SRI. A Tabela 7.1 apresenta um resumo do volume de dados que foram processados.

Tabela 7.1 – Número de dados radar do produto RAIN1 em função dos *raw data*.

Mês	n	Dados ok	Dados em falta	Dados duplicados
Janeiro	744	733	11	49
Fevereiro	696	690	6	4
Março	744	728	16	0
Abril	720	716	4	0
Mai	744	740	4	1
Junho	720	712	8	0
Julho	744	739	5	1
Agosto	744	742	2	1
Setembro	720	712	8	1
Outubro	744	738	6	0
Novembro	720	716	4	1
Dezembro	744	722	22	1
Total	8784	8688	96	59

Antes do processamento, foram filtrados valores de precipitação acumulada em 1h. Cerca de uma dezena, tinha valores superiores a 30 mm (ver Anexo I – Valores filtrados do produto RAIN1 do radar de CCL), sem qualquer significado meteorológico devido a ecos espúrios resultantes de propagação anómala e/ou da malha urbana sobre a região de Lisboa. Um dado relevante é que cerca de 50% dos valores filtrados correspondem às 08 e 09 UTC. Na Figura 7.2 (a) e (b) são ilustrados, com recurso a imagens do produto RAIN1 das 07 UTC de dia 14 de maio e das 06 UTC de dia 16 de julho, respetivamente, dois exemplos de valores espúrios (31,16 e 12,68 mm).

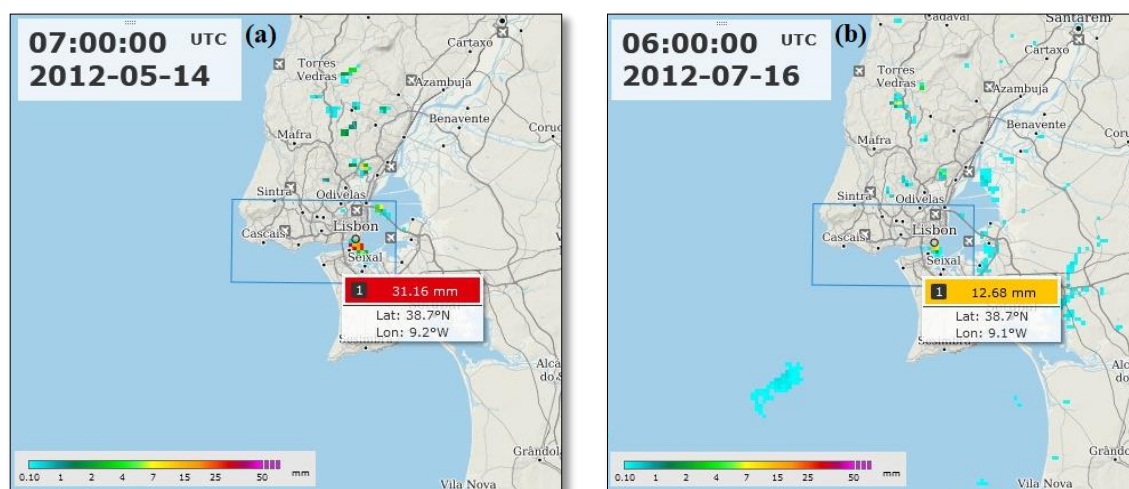


Figura 7.2 – Produto RAIN1, (a) das 07 UTC de dia 14 de maio de 2012 e (b) das 06 UTC de dia 16 de julho de 2012, do radar de CCL, com a área em análise delimitada pelo retângulo azul.

Em resultado do processamento do RAIN1 em função do produto SRI, a Figura 7.3 apresenta o gráfico do valor máximo da precipitação acumulada em 1 hora estimada pelo radar de CCL, para a área de estudo no ano de 2012.

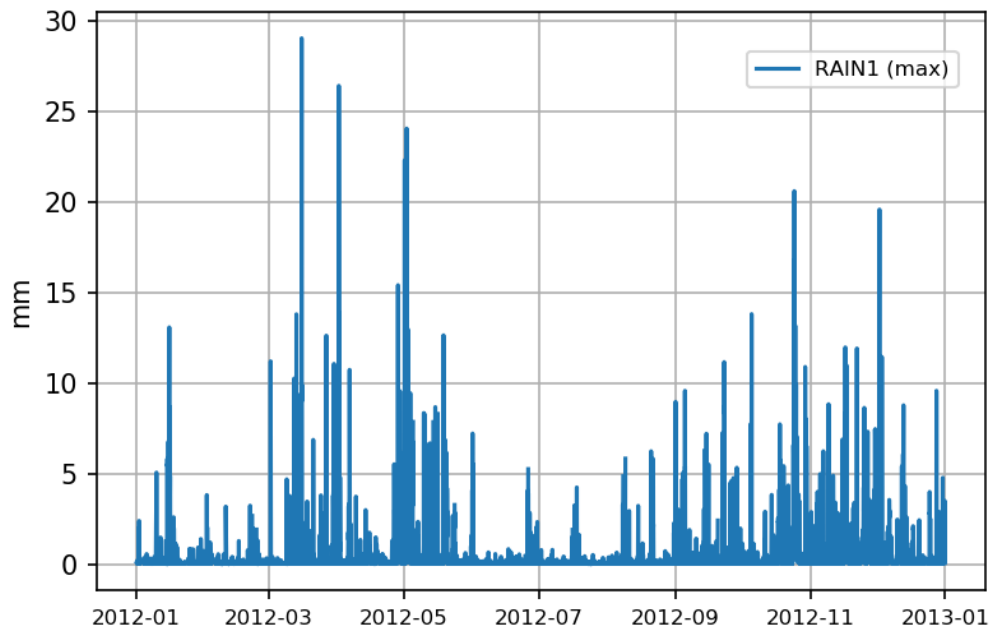


Figura 7.3 – Valor máximo do produto RAIN1 no ano de 2012.

Na Figura 7.4 exemplo para o mês de novembro de 2012. Todos os gráficos mensais estão disponíveis no Anexo II – Variação mensal dos valores máximos de RAIN1 para o ano de 2012.

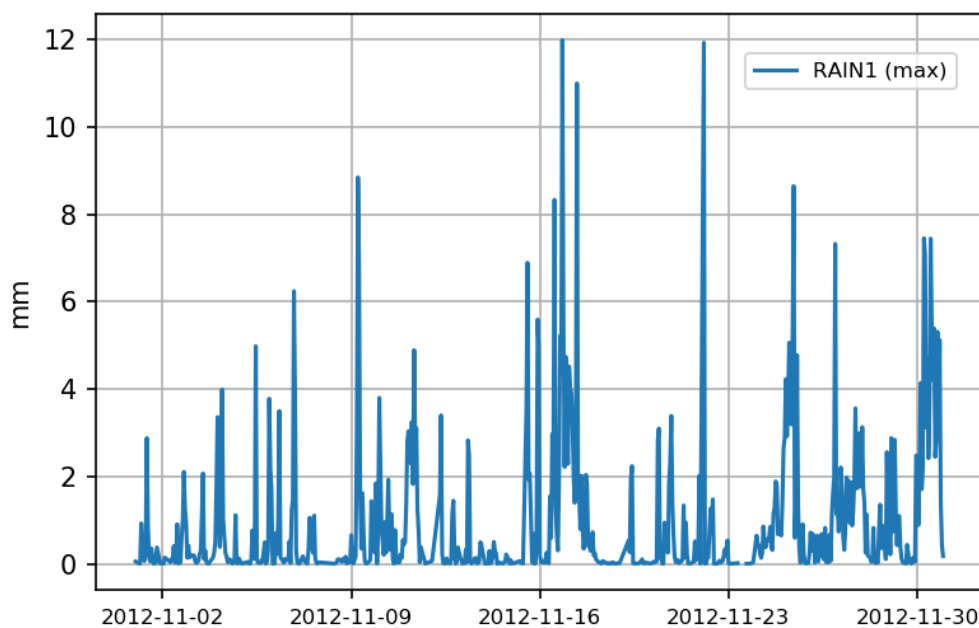


Figura 7.4 – Valor máximo do produto RAIN1 para novembro de 2012.

## 7.2 Dados GPS

Os dados de PWV para o ano de 2012 e para a totalidade dos sensores de GPS ilustrados na Figura 5.3 (a) ou, para maior detalhe, na Figura 6.1, estão representados no gráfico da Figura 7.5. O facto de uma massa de ar mais quente ter maior capacidade de integrar vapor de água é confirmado pelo aumento, em média, de PWV nos meses mais quentes quando comparado com os meses de outono/inverno. Para além disso, existe concordância entre estações na variação do PWV mas ainda assim algum desfaseamento, esperado, em função das distâncias geográficas a que se encontram os vários sensores.

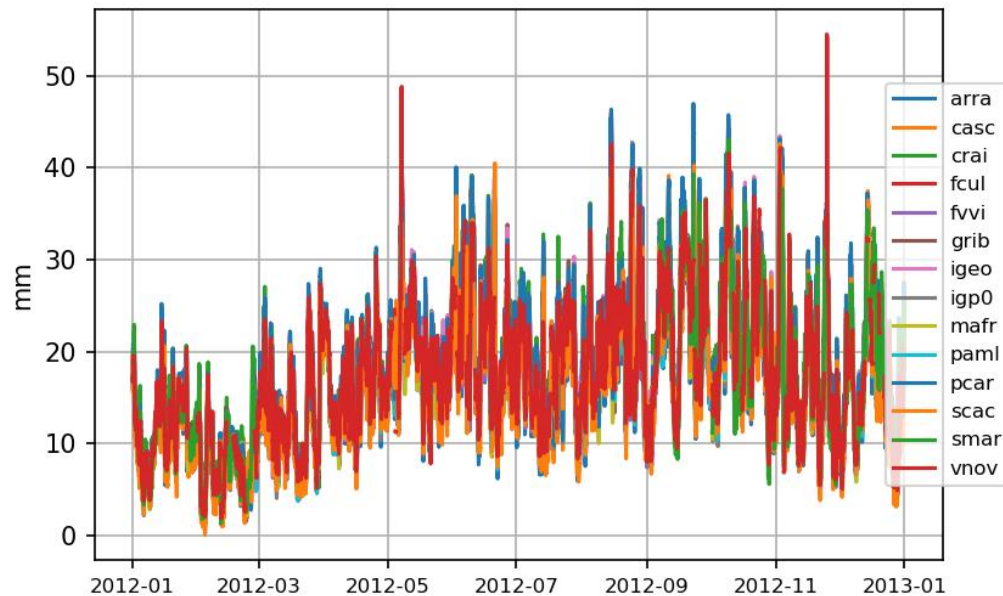


Figura 7.5 – PWV de todas as estações GPS em 2012.

A variação mensal de PWV de todos os sensores de GPS está disponível em anexo em 10.3. Para um maior detalhe, e considerando os cinco sensores abrangidos pela área de estudo, o gráfico resultante da variação anual do PWV encontra-se na Figura 7.6.

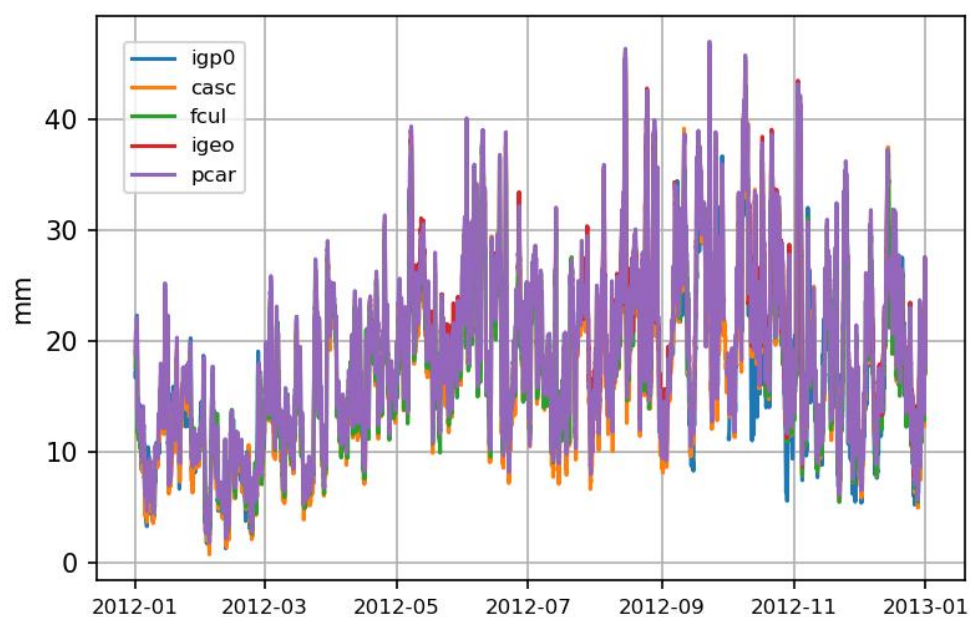


Figura 7.6 – Valores de PWV dos cinco sensores GPS, em destaque na Tabela 6.2, para o ano de 2012.

Na Figura 7.7, exemplo para o mês de março de 2012. De igual forma, a variação mensal de PWV para os sensores de IGP0, CASC, FCUL, IGEO e PCAR, para a totalidade do ano de 2012, pode ser consultada no Anexo IV.

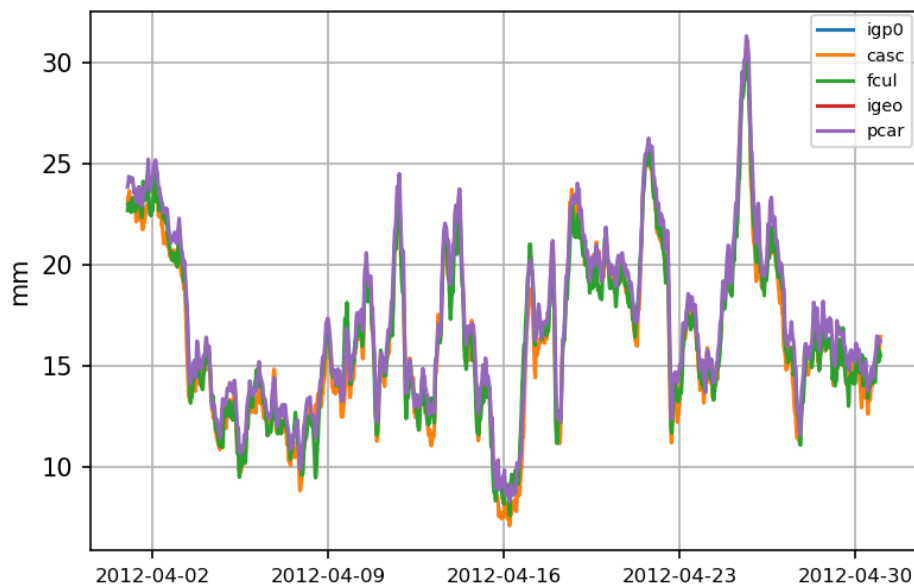


Figura 7.7 – Valores de PWV dos cinco sensores GPS para abril de 2012.

### 7.2.1 Comparação GPS – Radiosondagens

É referida frequentemente na literatura, por exemplo em (Tregoning, O'Brien e Hendy 1998) (Benevides, Catalao e Miranda 2015), (Martins, et al. 2017) e (Zhang, et al. 2018), a correlação entre dados de vapor de água precipitável e dados de água total precipitável obtidos pelas observações em altitude. Na presente tese, foram realizadas verificações semelhantes com base nos dados de PWV e dados de TPW resultantes das radiosondagens. Em 2012, as radiosondagens eram lançadas a partir da estação Gago Coutinho (EMA 579, ver Figura 7.8). Atualmente, as radiosondagens são lançadas, automaticamente, a partir do edifício sede do IPMA.

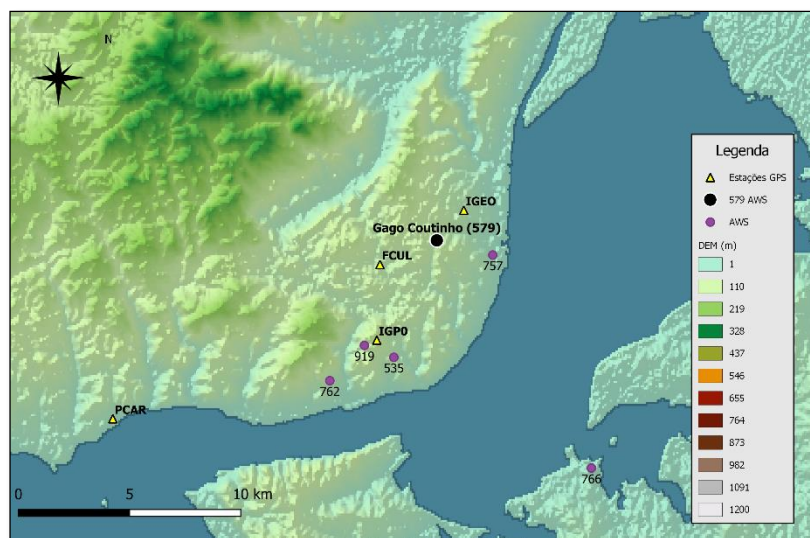


Figura 7.8 – Mapa com a localização e identificação de estações GPS (IGEO, FCUL, IGP0 e PCAR) e destaque para a estação automática de superfície de Gago Coutinho (579), local onde eram lançadas as radiosondagens em 2012.

Para esta análise a informação PWV utilizada proveio das estações IGP0, FCUL e IGEO. As figuras Figura 7.9 e Figura 7.10 mostram o resultado gráfico dessa comparação e confirmam a excelente correlação entre PWV e TPW.

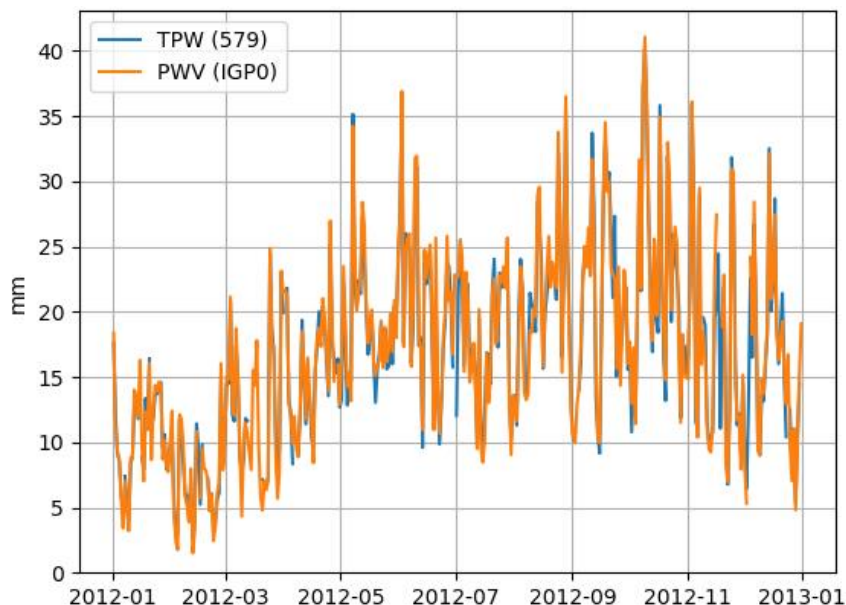


Figura 7.9 – Comparação dos valores de TPW, da estação 579, e os valores de PWV da estação IGP0 para o ano de 2012.

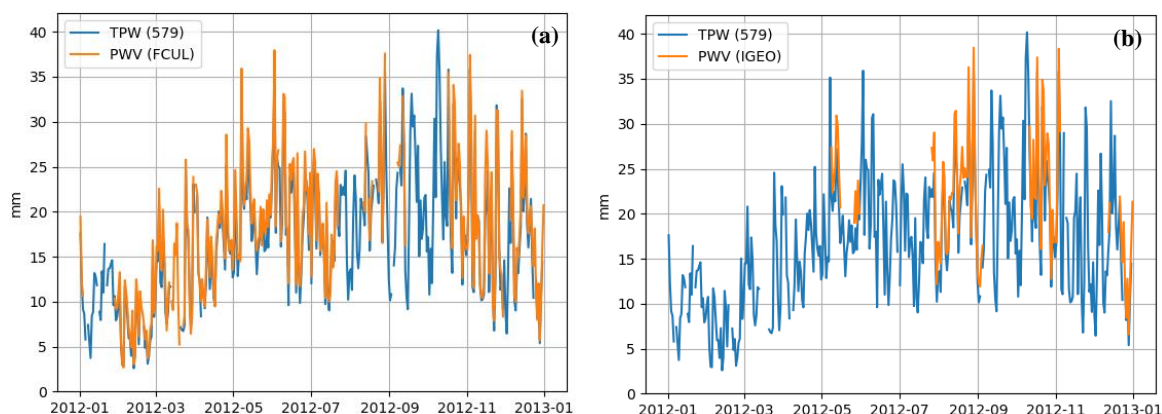


Figura 7.10 – Comparação dos valores de TPW, da estação 579, e os valores de PWV da estação (a) FCUL e (b) IGEO, para o ano de 2012.

Por ser o recetor GPS mais próximo e por ser a estação com menor falha de dados, foi produzido o gráfico de dispersão relativo à comparação da informação PWV e TPW, entre as estações IGP0 e 579, respetivamente, que se encontra ilustrado na Figura 7.11.

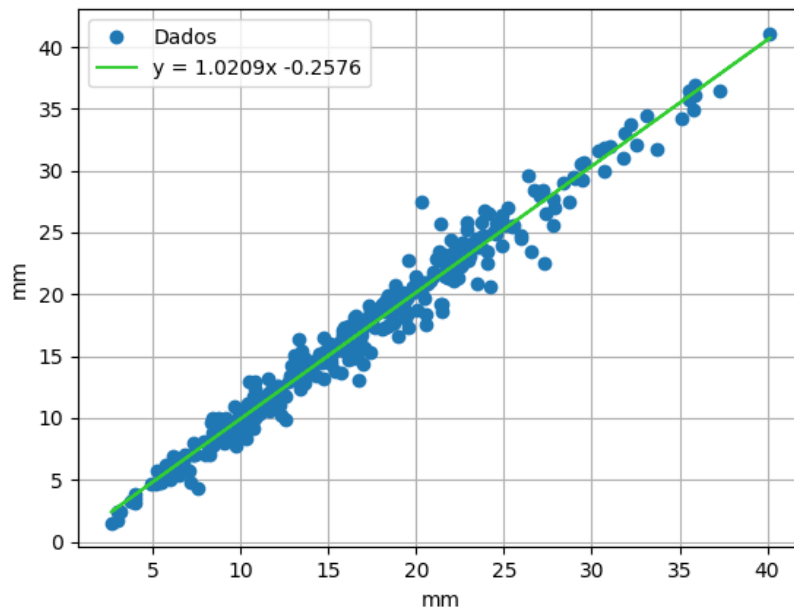


Figura 7.11 – Gráfico de dispersão entre os dados de TPW (EMA 579) e PWV (IGP0).

Por norma, é realizada apenas uma radiossondagem em Lisboa, aproximadamente às 12 UTC. Porém, em setembro e outubro de 2012, em virtude de uma campanha conjunta IPMA/FCUL, foram realizadas mais do que uma radiossondagem por dia, designadamente nas restantes horas sinópticas principais (00, 06 e 18 UTC). Esta informação extra possibilitou avaliar se a excelente correlação se mantém em períodos de tempo mais curtos, apenas de 6h ao invés das 24h dos gráficos anteriores. Assim, para o mês de setembro, foram analisados os seguintes períodos: [12 UTC dia 17; 12 UTC dia 19], [12 UTC dia 22; 18 UTC dia 24] e [12 UTC dia 25; 18 UTC dia 28] (Figura 7.12).

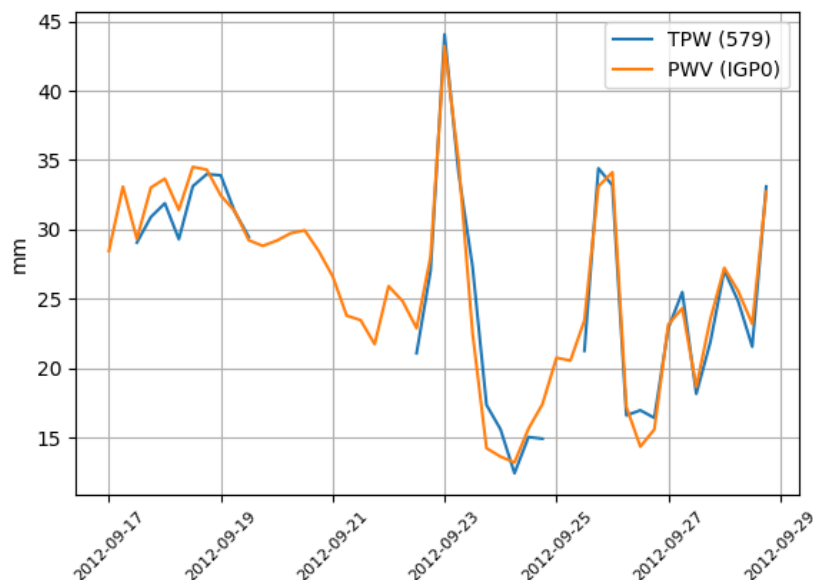


Figura 7.12 – Gráfico que compara o TPW da radiossondagem da estação 597 e o PWV da estação IGP0 para o período das 12 UTC de dia 17.setembro.2012 às 18 UTC de dia 28.setembro.2012.

Para o mês de outubro o período analisado encontra-se entre os dias 13 e 30, com destaque para os seguintes períodos com intervalos de 6h: [12 UTC dia 13; 12 UTC dia 14], [00 UTC dia 18; 12 UTC dia 19], [12 UTC dia 24; 18 UTC dia 26] e [12 UTC dia 29; 12 UTC dia 30] (Figura 7.13).

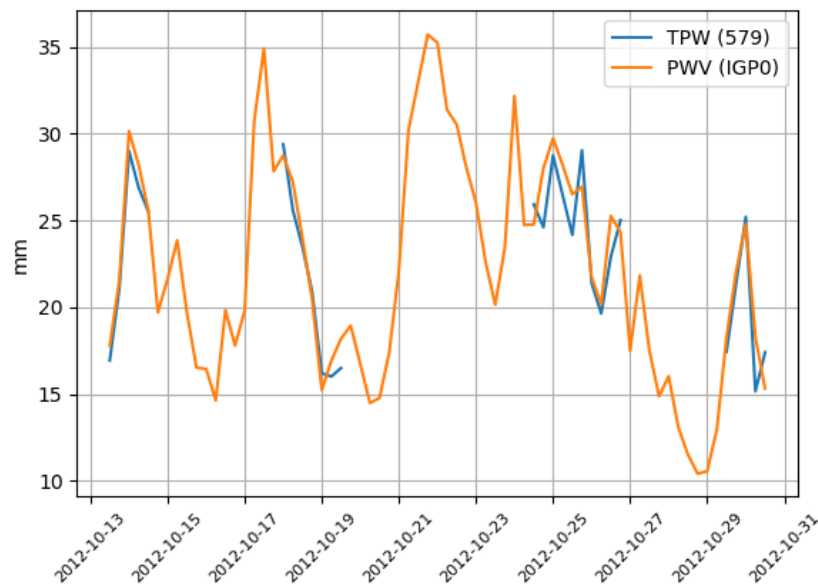


Figura 7.13 – Gráfico que compara o TPW da radiossondagem da estação 597 e o PWV da estação IGP0 para o período das 12 UTC de dia 13.outubro.2012 às 18 UTC de dia 30.outubro.2012.

A comparação entre ambas as curvas, de cada um dos dois gráficos anteriores, continua a corroborar a excelente relação entre valores de PWV e TPW para períodos inferiores a 24 horas.

### 7.3 Dados das Estações de Superfície

Foi reunida informação udométrica proveniente das estações meteorológicas automáticas de superfície, identificadas na Tabela 6.1, designadamente, a precipitação acumulada em 1 hora. Com base nestes dados, ilustra-se em Figura 7.14 (a) e (b) e Figura 7.15 a distribuição da precipitação horária, ao longo do ano de 2012, em função, respetivamente, das EMAs (I), EMAs (I e II) e EMAs + RUEMAs.

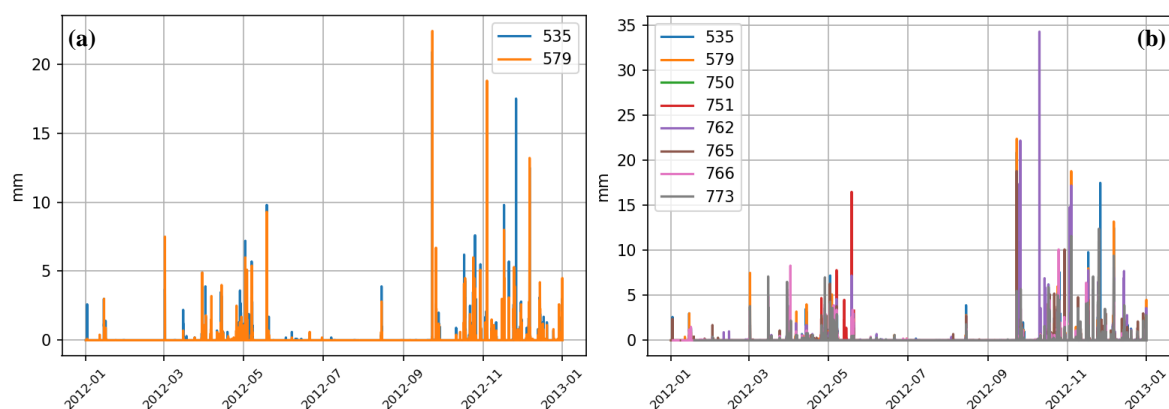


Figura 7.14 – Precipitação horária registada nas (a) EMAs (I) e (b) EMAs (I e II), durante o ano de 2012.

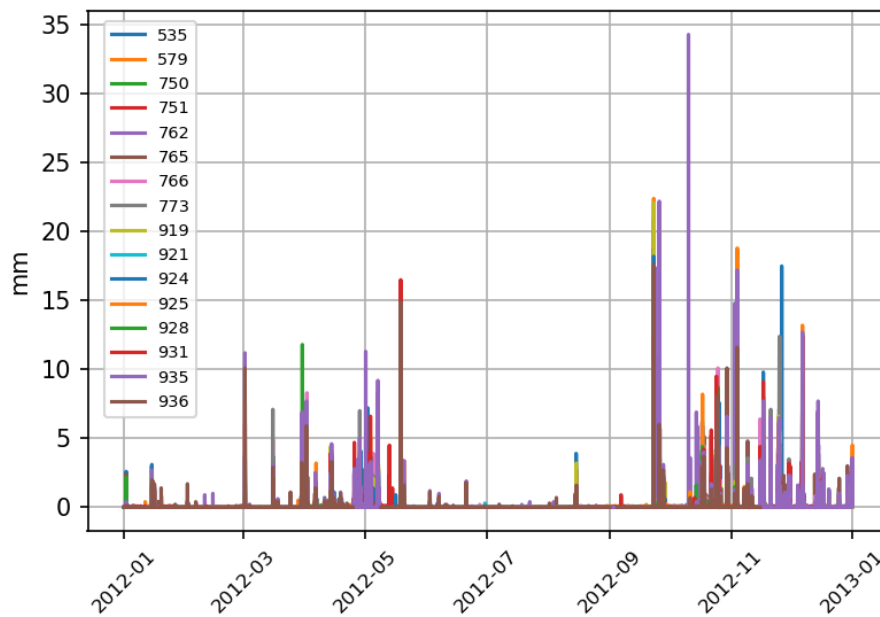


Figura 7.15 – Precipitação horária registrada nas EMAs e RUEMAs durante o ano de 2012.

Em ambos os gráficos, é notória a quase ausência de episódios de precipitação nos primeiros três meses do ano e, mais expectável, nos meses de verão.

### 7.3.1 Comparação EMAs – GPS

Neste capítulo foi avaliada a relação entre a ocorrência de episódios de precipitação no período em que a curva de PWV atinge um máximo ou se encontra num ramo descendente. Considerando que as estações de IGP0, CASC e PCAR são as que apresentam menos falhas, foi realizada a comparação entre o PWV destes 3 sensores e a precipitação horária das estações automáticas. O resultado para o ano de 2012 é o ilustrado no gráfico da Figura 7.16.

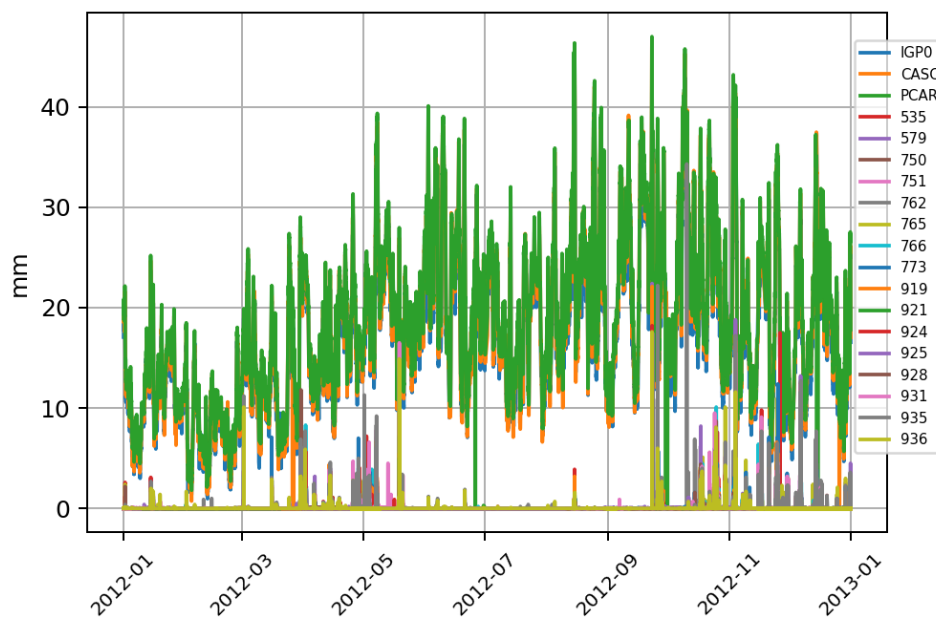
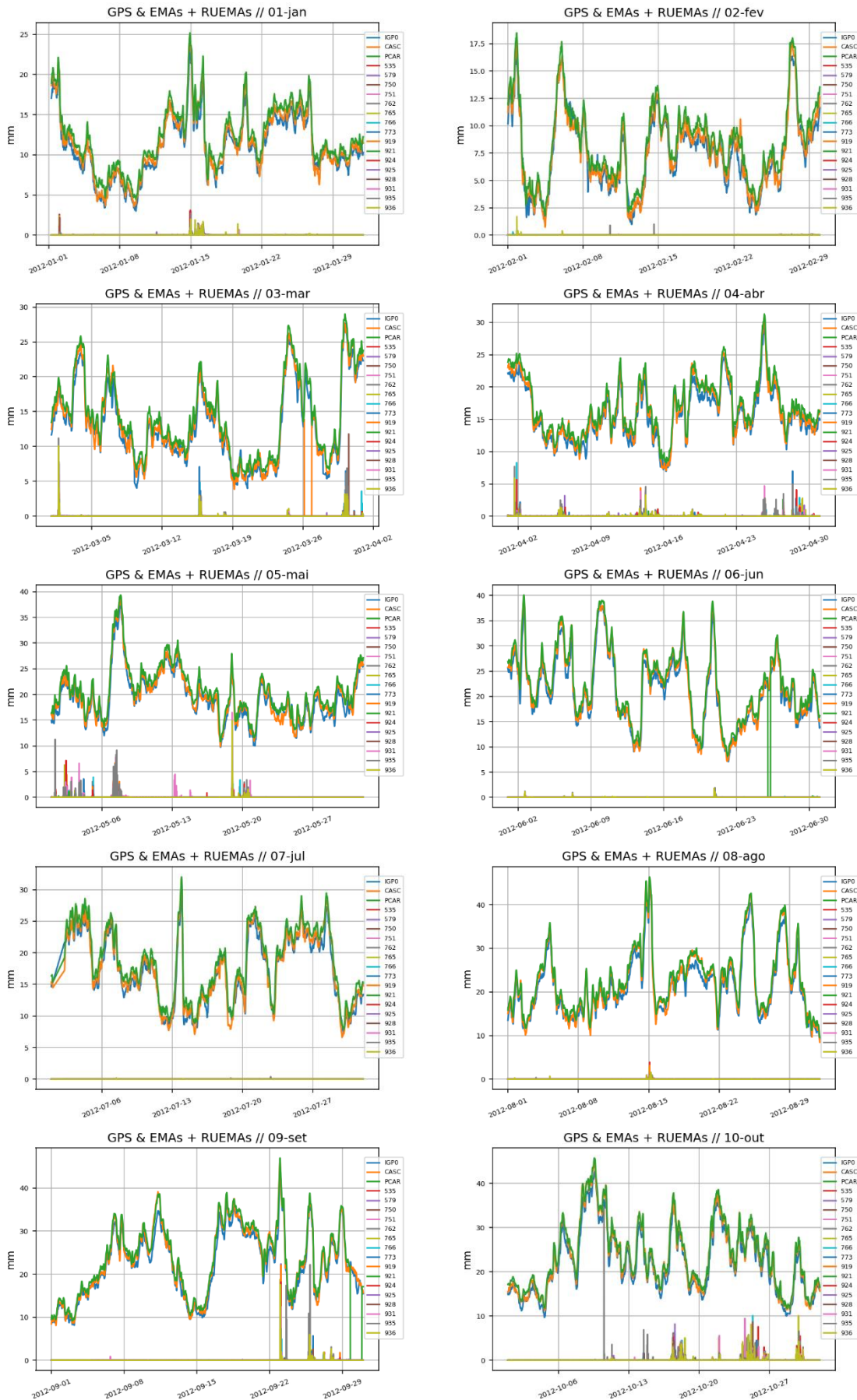


Figura 7.16 – Comparação anual entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR) e precipitação horária das estações automáticas.

Para uma evidente melhor interpretação, foi realizada a comparação mensal (Figura 7.17).



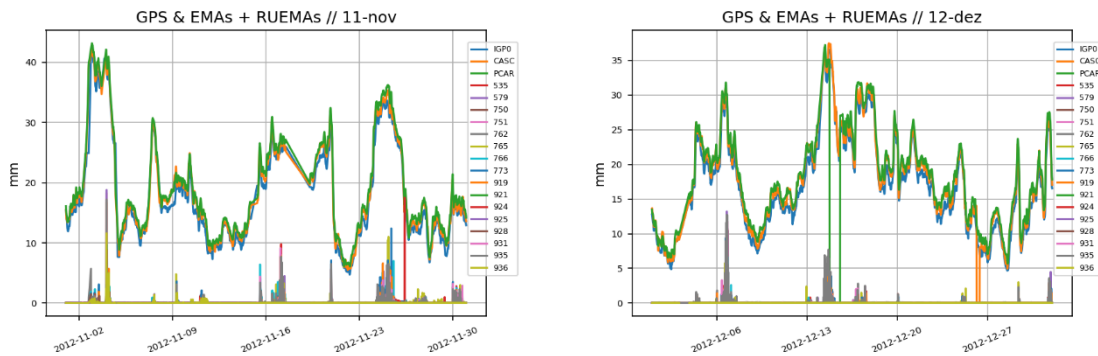


Figura 7.17 – Comparação mensal entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR) e precipitação horária das estações automáticas.

A maioria dos episódios de precipitação acontecem ou num pico de PWV ou na fase descendente da curva. Contudo, e mesmo retirando da interpretação os meses mais quentes, existem ainda vários períodos em que se verificou máximos relativos de PWV sem terem associados posteriores episódios de precipitação. Uma das possibilidades é a rede udométrica não ter registado precipitação de episódios, por exemplo, de origem convectiva que, pela sua natureza mais localizada, a água que chegou à superfície não precipitou nos udómetros. Nestas situações, o radar meteorológico representa uma vantagem como já explicado anteriormente. Assim, no subcapítulo seguinte, foi realizada uma comparação entre a precipitação acumulada horária nos udómetros e a estimada pelo radar através do produto RAIN1.

### 7.3.2 Comparação EMAs – Radar

Antes da comparação entre a precipitação horária proveniente das estações automáticas e do radar meteorológico foi realizada uma breve avaliação radar. A razão da escolha do produto SRI em vez do produto PCAPPI está relacionada com o facto de este produto permitir uma configuração personalizada a partir de conhecimento de alguns parâmetros típicos para a região geográfica. Como exemplos temos a possibilidade de distinguir casos de precipitação convectiva de precipitação de larga escala e/ou atribuir um valor para o nível da isotérmica zero como mencionado anteriormente. O intervalo compreendido entre os dias 20 a 30 de setembro, foi utilizado como período de controlo no sentido de se avaliar o produto que melhor serviria como base, na região em estudo, para o cálculo do produto de precipitação acumulada em 1h, RAIN1. O produto PCAPPI foi configurado para uma altitude de 700 m, por ser a altitude de observação da elevação mais baixa, em condições de propagação normais, sobre a estação IGP0. No período indicado, e para cada *timestamp* de precipitação horária radar, foi realizada uma média em área em função do *input* SRI (RN1S) ou *input* PCAPPI(R) a 700 m (RN1P07) (Figura 7.18).

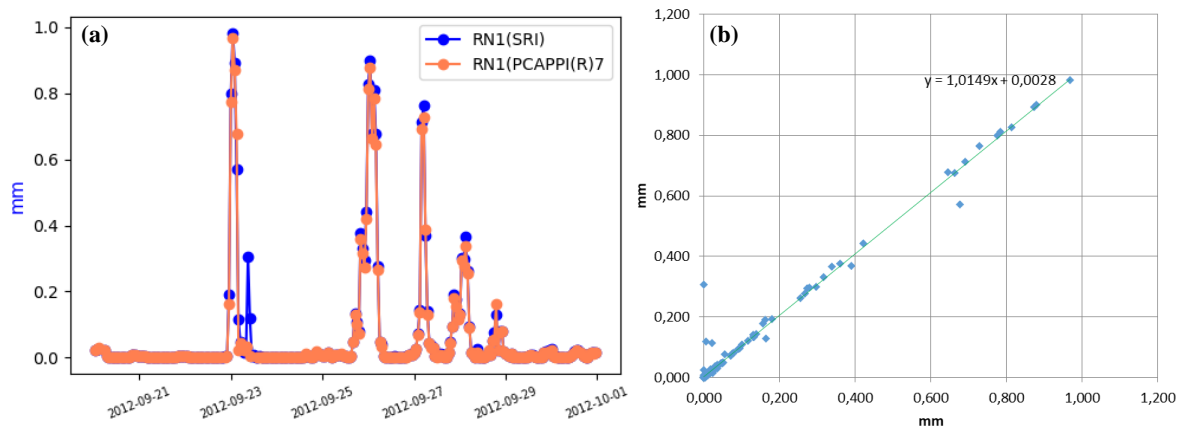


Figura 7.18 – (a) Comparação entre os valores de RAIN1, entre 20 a 30 de setembro de 2012, derivados do produto radar SRI e do produto radar PCAPPI(R) a 700 m e (b) o respetivo gráfico de dispersão.

As diferenças entre os dois produtos de entrada são residuais e, portanto, manteve-se o produto SRI como base de construção para o produto de precipitação acumulada radar. Assim, foi avaliada a comparação entre a precipitação horária das estações automáticas e o produto RAIN1, do radar de CCL, processado a partir do produto SRI (ver Figura 7.19).

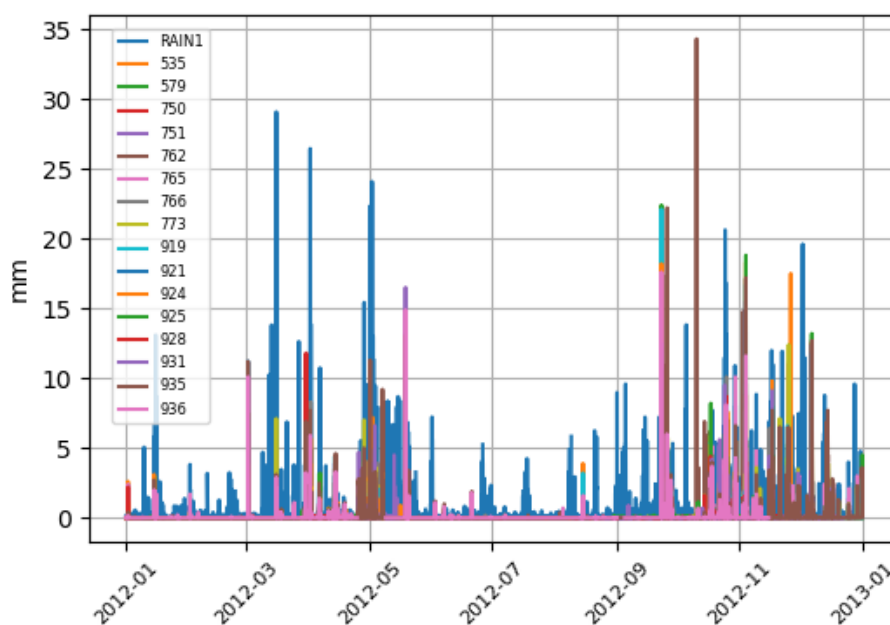


Figura 7.19 – Comparação da precipitação horária observada pelas estações automáticas e o produto RAIN1 para o ano de 2012.

Verifica-se que as observações resultantes do radar meteorológico permitiram acrescentar mais informação. Por um lado, episódios pontuais de precipitação que não tinham sido registados pelas estações e, por outro, caso tenham sido registados, algumas diferenças na quantificação. Contudo, de um modo geral são bastante coincidentes, contribuindo o facto de se estar a trabalhar numa área pequena e com grande densidade de estações automáticas de superfície.

Para um maior detalhe, foram produzidos os respetivos gráficos mensais. Na Figura 7.20, o exemplo para o mês de abril de 2012, onde se regista uma razoável concordância, no tempo de ocorrência e nos valores de precipitação horária, registados pela rede udométrica e a estimada pelo radar de CCL.

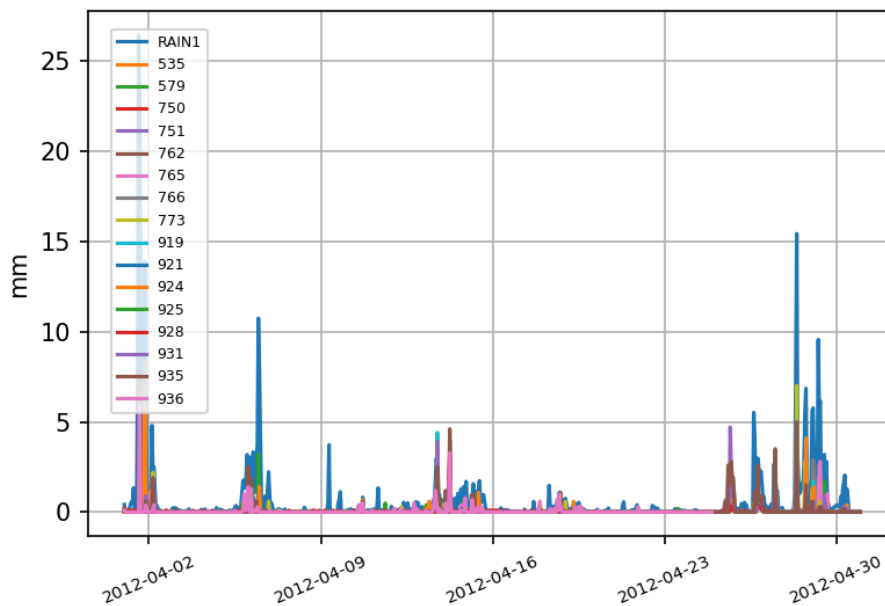


Figura 7.20 – Comparação da precipitação horária observada pelas estações automáticas e o produto RAIN1 para abril de 2012.

A comparação dos valores mensais de precipitação horária registada nas estações de superfície e a estimada pelo radar meteorológico está disponível no Anexo V.

## 7.4 Comparação Radar – GPS

De forma análoga ao que foi feito no subcapítulo 7.3.1, à comparação entre a precipitação horária das estações automáticas de superfície e o PWV dos sensores de GPS, foi acrescentada informação proveniente do campo da precipitação horária estimada pelo radar meteorológico. O resultado para o ano de 2012 é o ilustrado na figura seguinte (Figura 7.21).

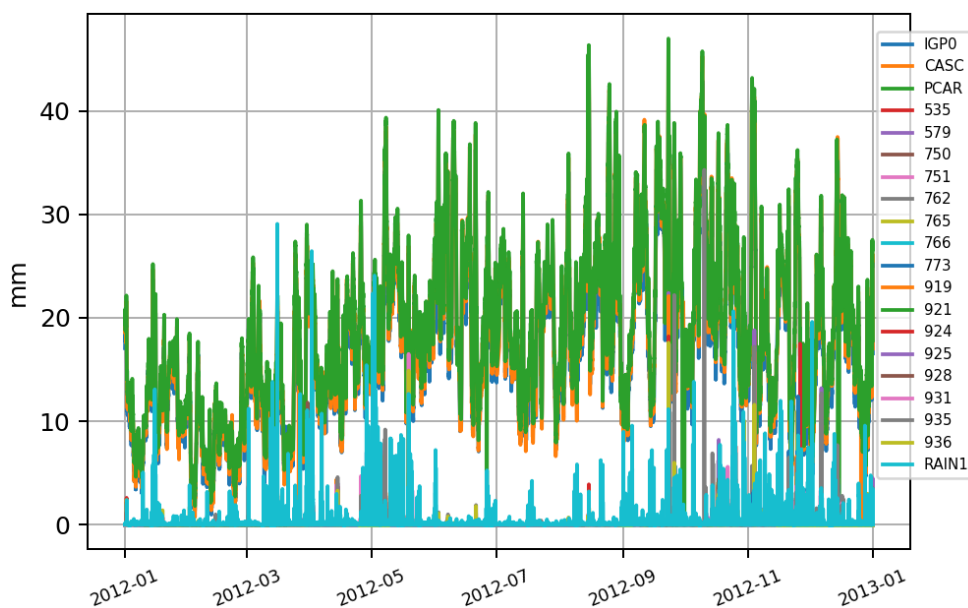
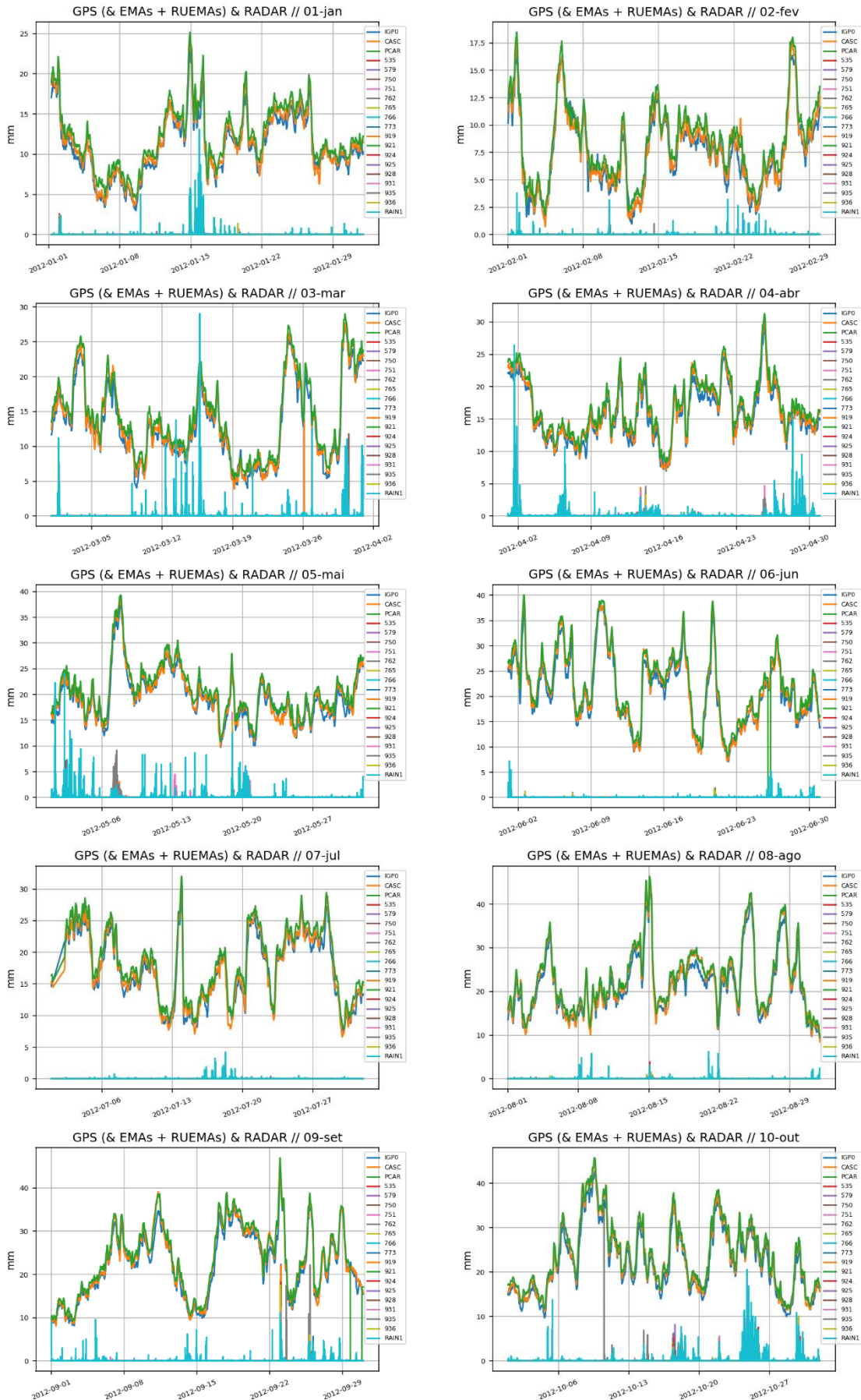


Figura 7.21 – Comparação anual entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR), precipitação horária das estações automáticas e produto RAIN1 do radar de CCL.

Para um maior detalhe e melhor interpretação, seguem na Figura 7.22 as comparações mensais.



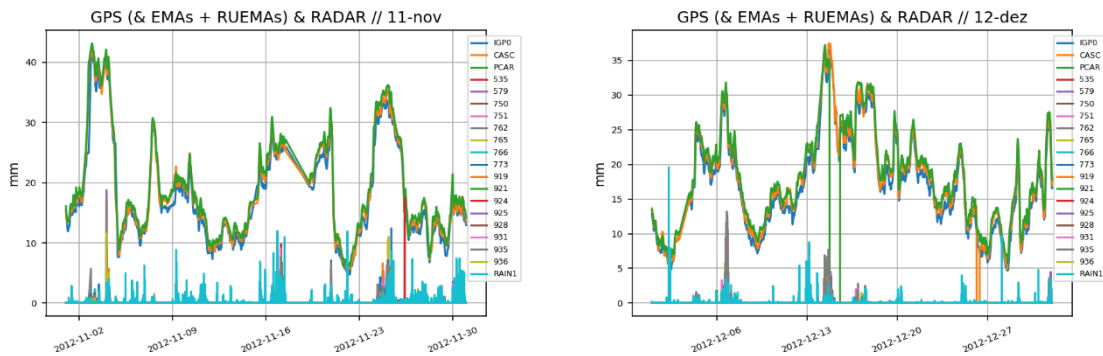


Figura 7.22 – Comparação mensal entre valores de PWV (IGP0, CASC e PCAR), precipitação horária das estações automáticas e produto RAIN1 do radar de CCL.

A informação do produto radar RAIN1 é, em conjunto com a informação udométrica, consistente com a ocorrência de precipitação durante valores máximos relativos de PWV ou na fase descendente dos mesmos, não obstante existirem vários máximos relativos de PWV sem qualquer episódio de precipitação associado.

A informação de precipitação proveniente do radar meteorológico identificou poucas situações que não fossem registadas pelas estações de superfície. Este resultado pode ser consequência de, pelo menos, quatro fatores, de forma isolada ou em conjunto: i) a dimensão da área de estudo; ii) de na mesma existir uma grande densidade udométrica; iii) os episódios de precipitação foram maioritariamente de origem estratificada ou bem distribuídos espacialmente; e iv) a reduzida ocorrência de episódios de precipitação durante o ano de 2012.

Sabemos que os dados de PWV calculados a partir do sinal de GPS resultam da presença de água / vapor de água na atmosfera ao passo que o radar meteorológico estima num volume observado a presença de água no seu estado líquido e/ou sólido em partículas com suficiente diâmetro para serem observadas pelo radar (*e.g.* 0,1 mm). De um ponto de vista teórico deverá haver um intervalo de tempo entre transições de fase e para o crescimento das gotículas. Este intervalo de tempo deverá ser observado quando comparamos por exemplo dados de PWV e de máximos de refletividade.

Se recorrermos a informação radar para uma estimativa da quantidade de precipitação que possa ter ocorrido à superfície é adequado recorrermos a produtos radar que foram processados para as elevações mais baixas, para que se possa extrair informação o mais próxima possível da superfície. Os produtos hidrológicos radar comuns, como são exemplo o de intensidade de precipitação e de precipitação acumulada, recorrem a algoritmos que recebem para processamento as observações das primeiras quatro elevações.

Embora a existência de uma correlação entre a variação dos valores de PWV e a ocorrência de precipitação, como referido e analisado anteriormente ou na literatura, como por exemplo, (Benevides, Catalao e Miranda 2015) e (Zhao, Yao e Tao 2018), existe ainda uma alta taxa de falsos positivos. Nesse sentido, avaliou-se a relação entre a variável PWV e outro produto radar.

O radar pode e é, efetivamente, uma ferramenta útil para estimar campos de precipitação pela vantagem de observação em área, não obstante este tipo de análise ser realizada *a posteriori*. Assim, será mais profícuo, até do ponto de vista de *nowcasting* que o radar meteorológico acrescenta na previsão, fazer uso de outras variáveis, e consequentemente de outros produtos, para identificar

processos e/ou construir algoritmos que permitam melhorar, antecipando, o tempo de previsão antes de qualquer evento de precipitação ocorra em determinada região.

O PWV representa a observação de um cone atmosférico invertido, abrangendo um diâmetro de cerca de 35 km a 850 hPa quando os dados GNSS são aceitos a partir de uma elevação de 5° (Hanssen 2002) (Miranda e Mateus 2021). Deste modo, para uma análise comparativa com o PWV faz sentido, na ótica radar, utilizar produtos que derivam de um processo baseado no número máximo de elevações, ou seja, numa maior observação possível da estrutura vertical do volume observado.

A Figura 7.23 ilustra um corte vertical sobre o diagrama de radiação, do radar de CCL, do conjunto das 14 elevações que completam o rastreamento de refletividade, sendo este constituído por três sub-rastreamentos. Conforme Tabela 6.4 e Figura 7.23, o primeiro sub-rastreamento, denominado REFLECTVOL\_A, é constituído pelas quatro primeiras elevações, entre o 0,1° (elevação mais baixa) e os 2,9°, o segundo, denominado REFLECTVOL\_B, também constituído por quatro elevações entre os 3,9° e os 7,2° e, por último, o terceiro sub-rastreamento, denominado REFLECTVOL\_C, onde se encontram seis elevações entre os 8,5° e os 19,5°.

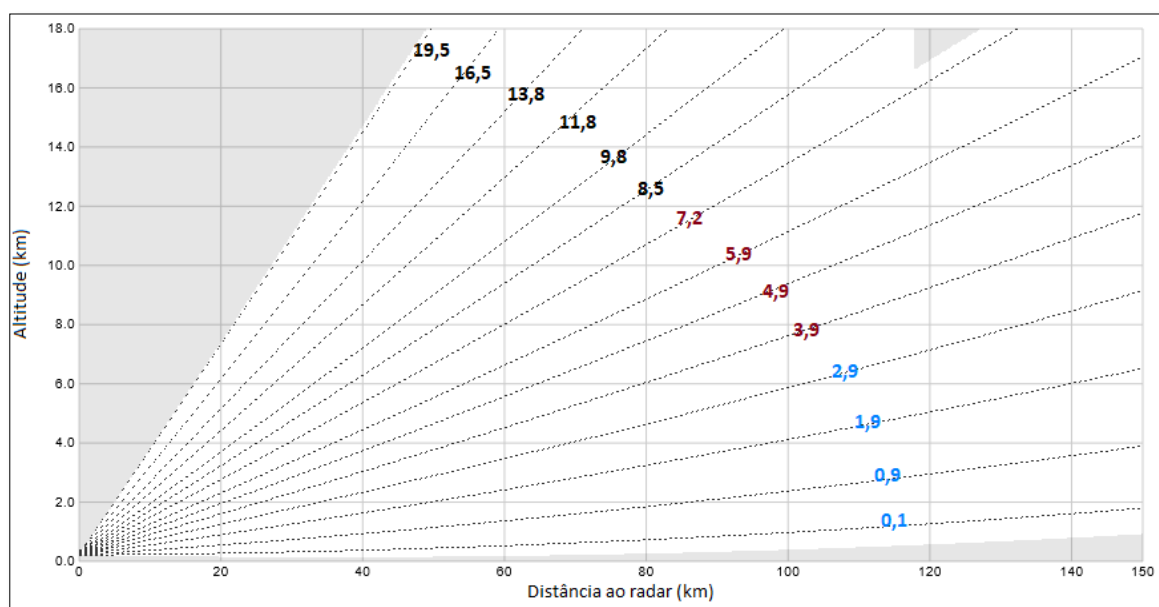


Figura 7.23 – *Cross-section* do diagrama de propagação da radiação do conjunto dos sub-rastreamentos da refletividade, com identificação do ângulo (em °) correspondente a cada elevação, do radar de CCL.

A área de estudo em relação ao radar de CCL é observada a diferentes altitudes devido à distância a que se encontra do radar de CCL e também às diferentes elevações utilizadas na estratégia de rastreamento. Na Figura 7.24 podemos visualizar sobre as coordenadas de cada um dos vértices da área de estudo, a altitude a que é realizada observação radar em função de, por exemplo, cinco elevações não sequenciais (as primeiras de cada sub-rastreamento e as últimas dos sub-rastreamentos REFLECTVOL\_A e REFLECTVOL\_B) que integram o rastreamento operacional, para o campo da refletividade, do radar de CCL.

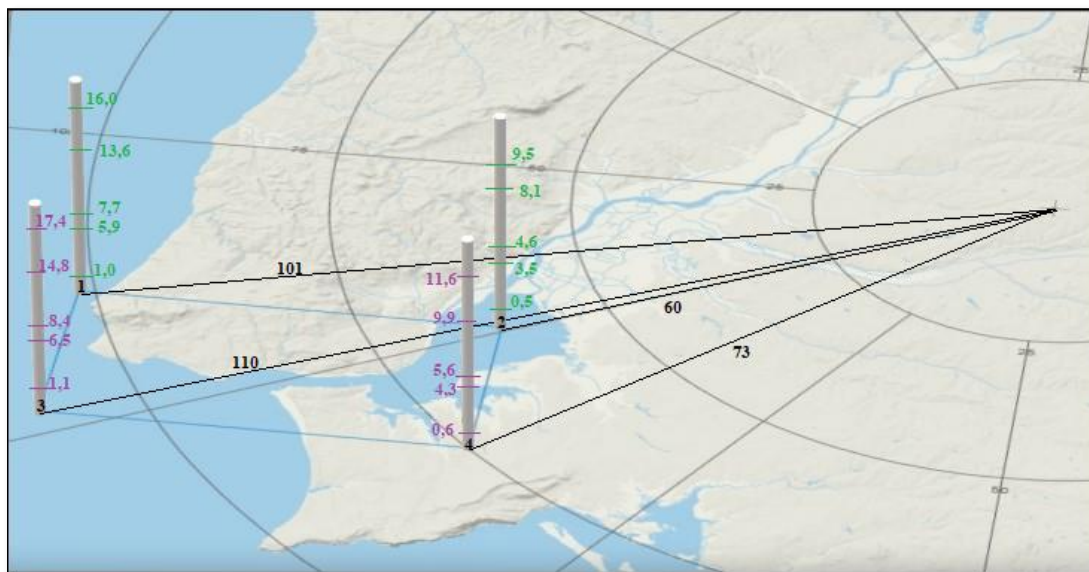


Figura 7.24 – Mapa com área de estudo em destaque com identificação dos vértices que a constituem (barras verticais brancas), a distância horizontal (em km) correspondente à estação radar de CCL (linhas a preto) e as altitudes de observação (valores a verde e roxo) em função dos ângulos de elevação 0,1°, 2,9°, 3,9°, 7,2° e 8,5°. Nota: as altitudes não estão à escala.

Para um maior detalhe a que altitude é realizada cada elevação, e considerando o axoide do feixe radar, a Tabela 7.2 apresenta os respetivos valores sobre cada um dos vértices em função do ângulo de elevação.

Tabela 7.2 – Altitudes (em km) a que é realizada a observação, em função do ângulo de elevação, sobre cada um dos vértices/pontos (Pn) que delimitam a área de estudo.

Elevação (°)	Altitude de observação (km)			
	P1	P2	P3	P4
0,1	1,0	0,5	1,1	0,6
0,9	2,4	0,9	2,6	1,7
1,9	4,2	2,4	4,6	3,0
2,9	5,9	3,5	6,5	4,3
3,9	7,7	4,6	8,4	5,6
4,9	9,5	5,6	10,3	6,9
5,9	11,3	6,7	12,3	8,2
7,2	13,6	8,1	14,8	9,9
8,5	16,0	9,5	17,4	11,6
9,8	18,3	10,9	20,0	13,4
11,8	*	13,2	*	16,1
13,8	*	15,4	*	18,8
16,5	*	18,5	*	*
19,5	*	*	*	*

\*Observação fora do volume observado pelo radar.

Para o efeito, e seguindo o procedimento descrito no subcapítulo 6.3, foi gerado o produto de máximos de refletividade, com uma periodicidade de 10 minutos, e avaliada a relação entre os valores máximos deste produto e o PWV para períodos distintos do ano de 2012.

O produto MAX(Z) resulta, numa primeira fase, da observação radar dos três sub-rastreios volumétricos mencionados anteriormente e, posteriormente, da integração dos sucessivos PCAPPI, neste caso, de refletividade (PCAPPI(Z)). Sobre esta informação tridimensional é selecionado o valor mais elevado na vertical de cada *pixel*. Este produto produz outra informação adicional, que corresponde aos valores mais elevados considerando as projeções Norte-Sul e Oeste-Este. O produto MAX(Z) foi configurado e gerado com as seguintes características: i) alcance horizontal de 150 km; ii) altura da camada delimitada entre os 300 m e os 16 km; e iii) resolução de 5 km x 5 km. Na Figura 7.25 estão identificados os pontos da malha radar utilizados na comparação com o PWV, sendo que para cada *timestamp*, do produto radar, foi extraído o valor máximo na área de estudo.

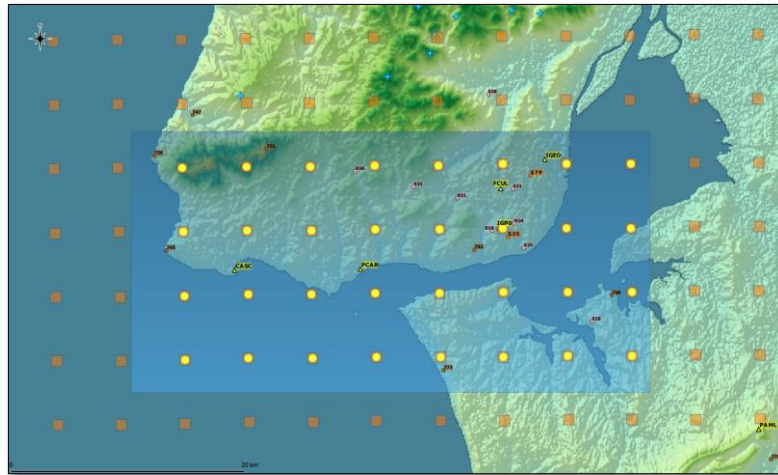


Figura 7.25 – Mapa com a sobreposição da malha radar, com resolução de 5 km x 5 km, (quadrados a cor-de-laranja) e com os pontos utilizados da malha radar (círculos a amarelo) sobre a área de estudo (retângulo azul).

## 7.5 Comparação Radar/GPS – estudo de casos

Para a comparação Radar/GPS foram selecionados e interpretados alguns períodos de 2012. Um, mais longo, a que corresponde a totalidade do mês de outubro e outros três, mais curtos, a que correspondem os seguintes intervalos de tempo: 14 a 16 de janeiro, 15 de março e 14 a 15 de agosto de 2012. Os casos de menor extensão temporal, mas com valores máximos de PWV superiores a 20 mm, foram acompanhados de um breve enquadramento sinóptico.

Posteriormente, foi avaliado um quarto caso, o período de 23 a 25 de agosto, em que os valores de PWV aumentaram significativamente até aos 40 mm mas sem ocorrência de precipitação na área de trabalho. Porém, recorrendo a uma maior extensão geográfica observada pelo produto radar RAIN1 foi possível identificar regiões, com valores de precipitação acumulada, exteriores à área de estudo.

### 7.5.1 Estudo de caso – Outubro de 2012

Este mês tem a particularidade de possuir um período em que a valores mais elevados de PWV, com um máximo absoluto de 45,75 mm, não esteve associado qualquer episódio de precipitação mas, por outro lado, em máximos relativos de PWV ligeiramente mais baixos, principalmente na segunda quinzena de outubro, ocorreram episódios de precipitação (Figura 7.26). A Figura 7.27 acrescenta os valores de precipitação horária das estações meteorológicas automáticas e do produto RAIN1.

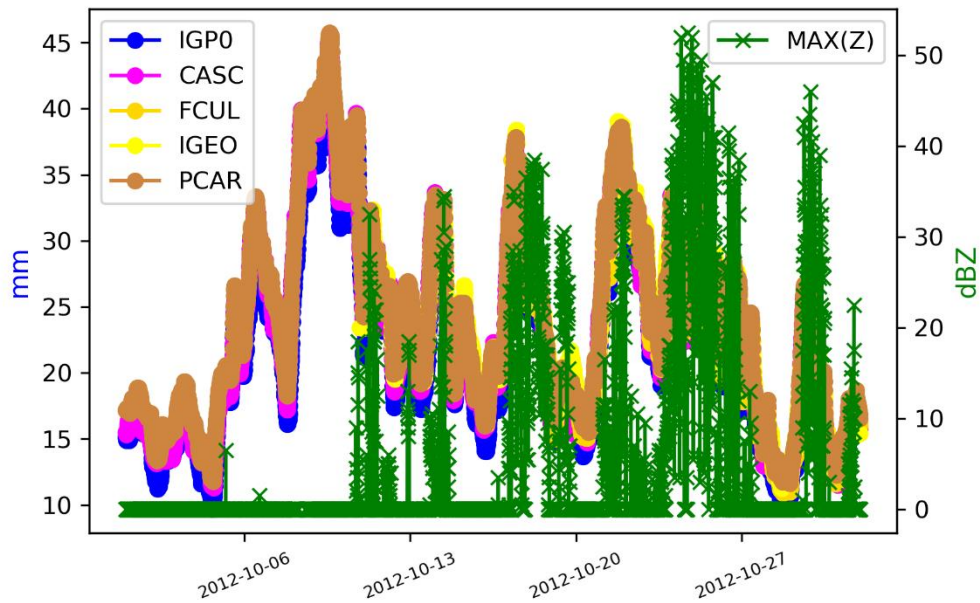


Figura 7.26 – Gráfico de PWV e os valores máximos do produto MAX(Z) para o mês de outubro de 2012.

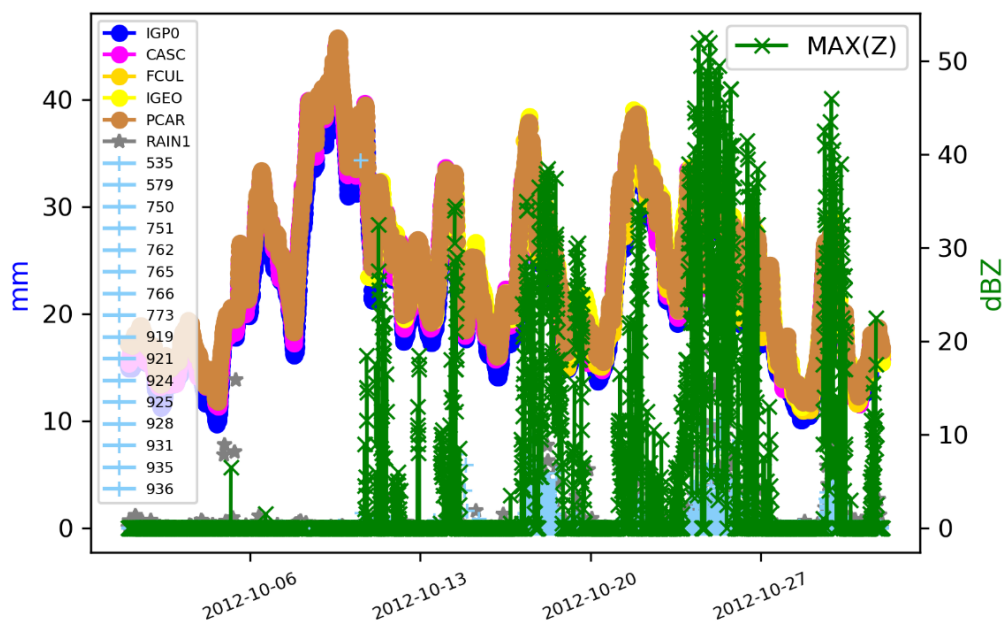


Figura 7.27 – Gráfico de PWV, valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o mês de outubro de 2012.

Para um maior detalhe do mês de outubro, seguem os gráficos de PVW, de máximos de MAX(Z) (mM(Z)) e valores de precipitação horária para a primeira e segunda quinzena (Figura 7.28 e Figura 7.29).

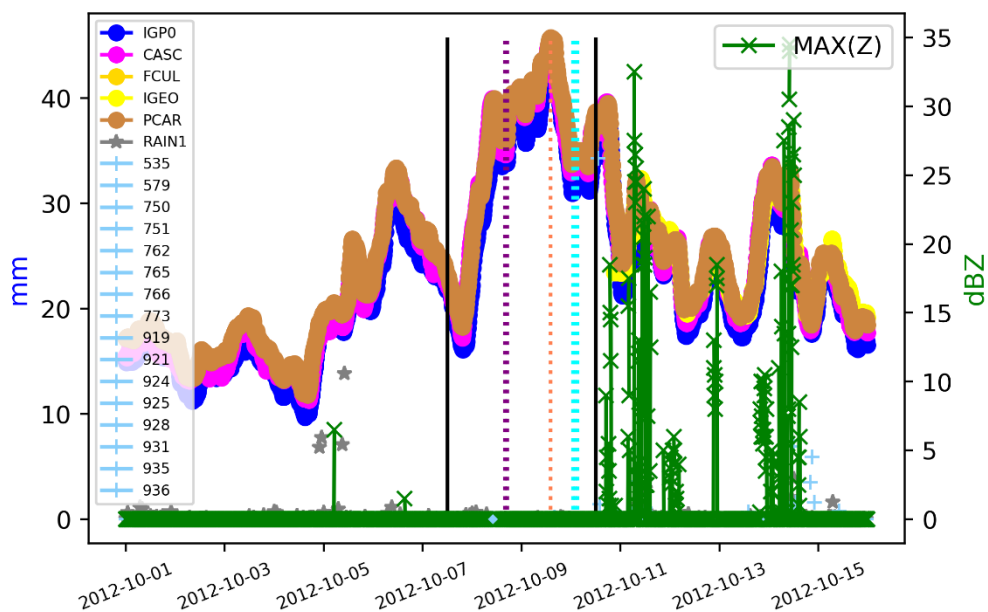


Figura 7.28 – Gráfico de PWV (5 sensores), valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o período de 1 a 15 de outubro de 2012. Período das 12 UTC de dia 7 às 12 UTC de dia 10 de outubro de 2012 delimitado por barras verticais a preto e instantes 16 UTC e 17 UTC de dia 8, 14 UTC de dia 9 e 01, 02 e 03 UTC de dia 10 de outubro identificados, respetivamente, por barras verticais a tracejado roxo, cor-de-laranja e azul claro.

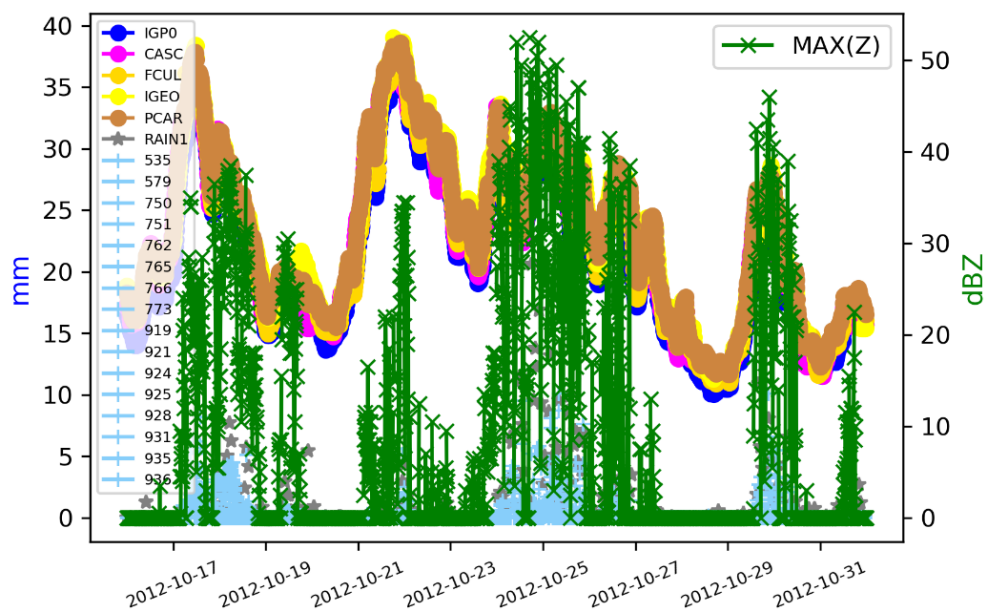


Figura 7.29 – Gráfico de PWV (5 sensores), valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o período de 16 a 31 de outubro de 2012.

No gráfico da Figura 7.28, o intervalo entre as 12 UTC de dia 7 e as 12 UTC de dia 10 de outubro, delimitado pelas barras verticais a preto, apresenta valores elevados de PWV mas sem informação associada, pelo menos na área em análise, de valores de refletividade e de precipitação. Se se recorrer a uma observação radar que se prolongue para além dos limites da região em análise, verifica-se que o radar estimou precipitação, embora por vezes fraca e bastante localizada no espaço. Na Figura 7.30 ilustra-se o produto RAIN1 das 16 e 17 UTC de dia 8 ((a) e (b)) a que correspondem os instantes das primeiras linhas a tracejado roxo da Figura 7.28, com valores inferiores a 1 mm na região de Figueira

da Foz e a norte de Coimbra. Em (c), o RAIN1 das 14 UTC de dia 9, a que corresponde o instante da linha a tracejado cor-de-laranja e o valor mais elevado de PWV na Figura 7.28, com valores inferiores a 0,5 mm em regiões pontuais da Estremadura e na região de Pombal. A restante sequência, em (d), (e) e (f), o RAIN1 das 01, 02 e 03 UTC de dia 10 de outubro, a que correspondem os instantes das linhas a tracejado azul claro em torno de um mínimo relativo de PWV da Figura 7.28, com valores que chegaram próximo dos 3 mm na região de Aveiro.

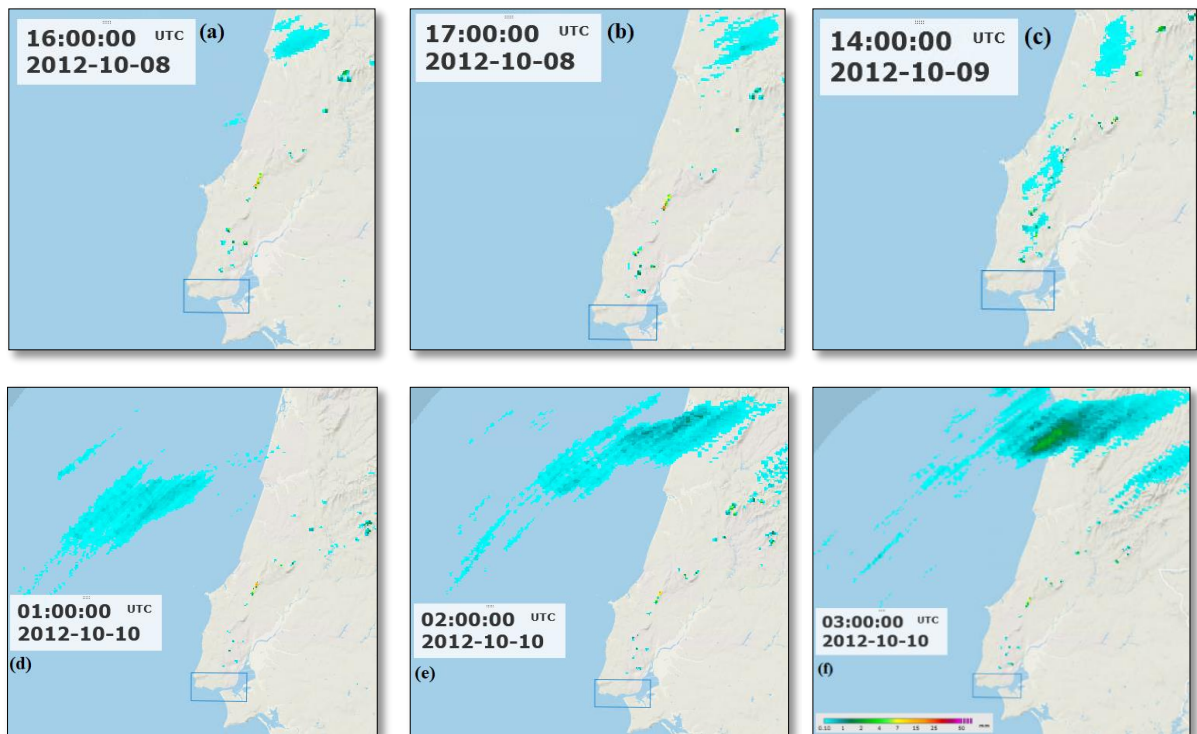


Figura 7.30 – Produto RAIN1 das (a) e (b) 16 e 17 UTC de dia 8, (c) 14 UTC de dia 9, (d) a (f) 01 a 03 UTC de dia 10 de outubro de 2012, do radar de CCL.

No final da primeira quinzena e no restante mês de outubro (Figura 7.29), existe uma concordância entre a variação de PWV e a variação de  $mM(Z)$  e consequentes ocorrências de episódios de precipitação.

### 7.5.2 Estudo de caso – 14 a 16 de janeiro

Do ponto de vista sinóptico (Figura 7.31 (a)), no dia 14, Portugal continental foi condicionado por um anticiclone localizado a oeste do arquipélago dos Açores e por uma superfície frontal fria que se aproximou do Continente durante a tarde, sendo que no dia 15, fez a sua passagem sobre o território do continente. Na Figura 7.31 (b) imagem radar do produto MAX(Z) das 2130 UTC de dia 14 de janeiro de 2012.

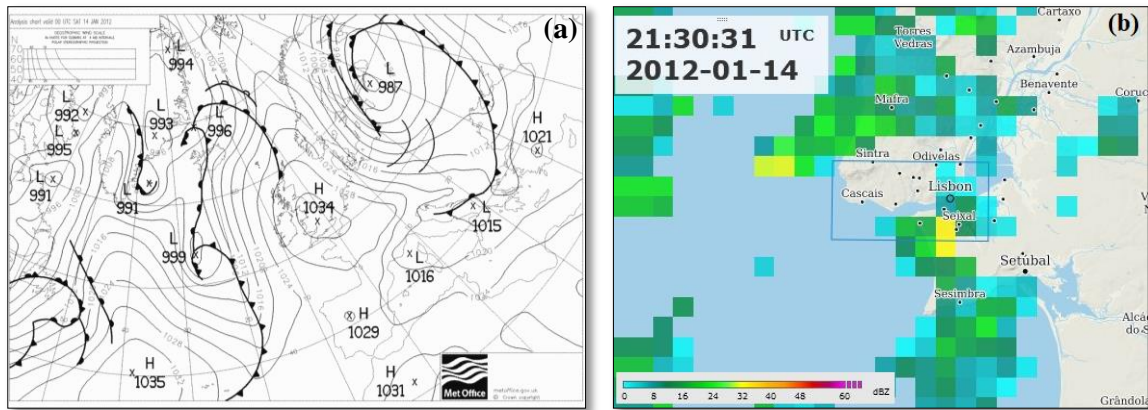


Figura 7.31 – (a) Carta da análise de superfície das 00 UTC de dia 14 de janeiro de 2012 (*MetOffice*) e (b) produto MAX(Z), do radar de CCL, das 2130 UTC de dia 14 de janeiro de 2012.

Neste período os sensores de GPS das estações FCUL e IGEO não disponibilizavam dados, pelo que a comparação foi realizada com as estações de IGPO, CASC e PCAR. O resultado gráfico é o ilustrado na Figura 7.32.

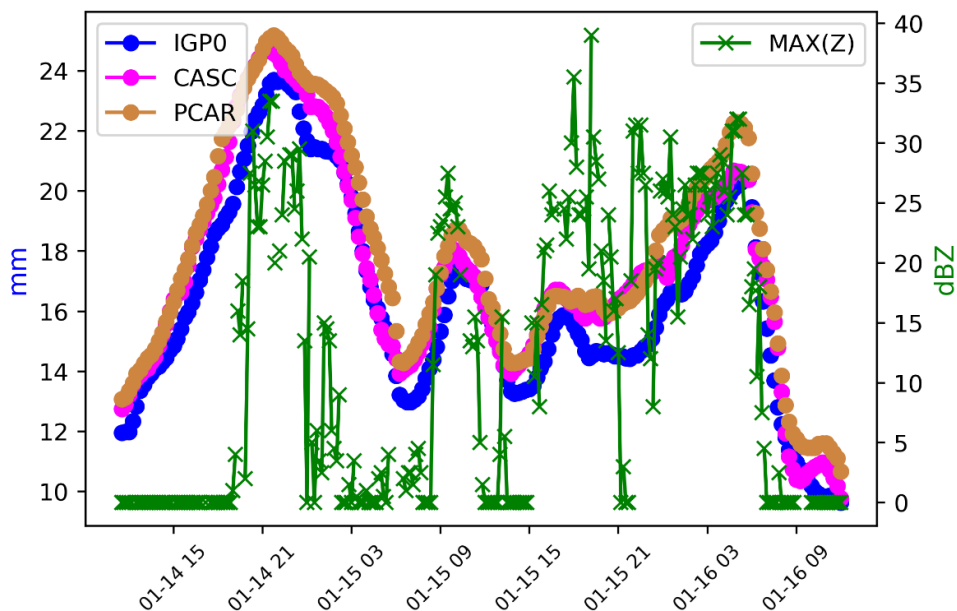


Figura 7.32 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGPO, CASC e PCAR e os valores máximos do produto MAX(Z) para o intervalo das 1130 UTC de dia 14 de janeiro às 1200 UTC de dia 16 de janeiro de 2012.

O gráfico anterior, numa primeira análise, demonstra que a curva de  $mM(Z)$  acompanha a evolução das curvas de PWV. No entanto, e considerando o primeiro pico, desde o início do aumento de valores de PWV, às 1130 UTC, o primeiro valor diferente de zero da refletividade aparece às 19 UTC, ou seja, 7 horas e 30 minutos depois. Nas variações seguintes de PWV, a curva de  $mM(Z)$ , ainda manifesta algum atraso, mas com menor desfasamento temporal. A diferença no tempo de reação da curva de  $mM(Z)$  relativamente às curvas de PWV estará relacionada com o tempo em que o processo de transição de fase se processa e para o crescimento das gotículas a partir do qual o radar meteorológico as deteta no volume observado.

Posteriormente, foram adicionados os dados de precipitação horária, das EMAs, RUEMAs e do produto RAIN1, ao gráfico anterior sendo o resultado ilustrado na Figura 7.33.

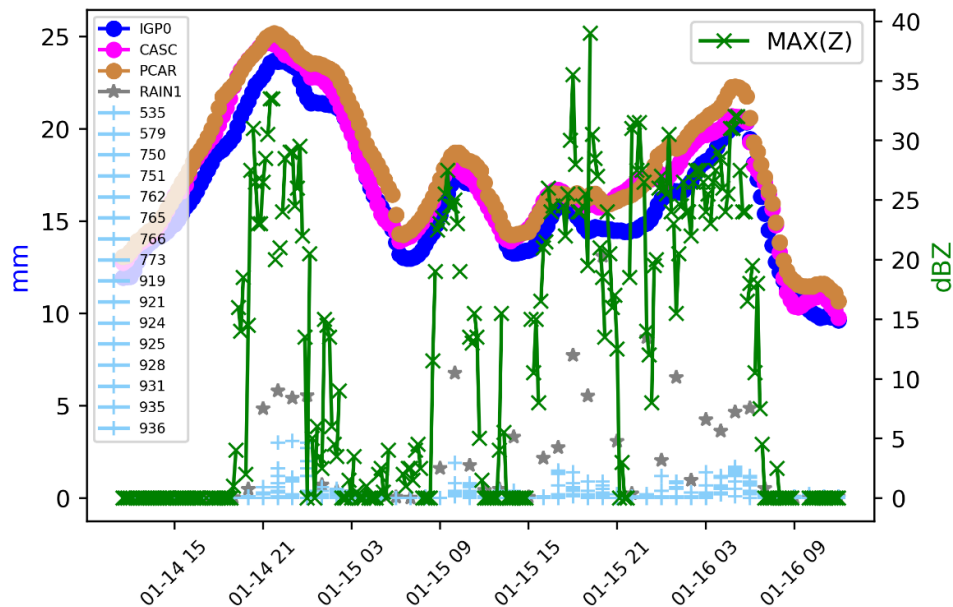


Figura 7.33 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGPO, CASC e PCAR, os valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o intervalo das 1130 UTC de dia 14 de janeiro às 1200 UTC de dia 16 de janeiro de 2012.

No período em análise, a precipitação, com valores moderados para este caso, ocorreu na vizinhança e no ponto de inflexão da curva de PWV. Os valores de precipitação estimados pelo radar são coincidentes temporalmente com o da rede udométrica, mas apresentam uma grandeza ligeiramente superior.

### 7.5.3 Estudo de caso – 15 de março

No dia 15 de março de 2012, o território do continente foi condicionado por uma depressão centrada a sudoeste da Península Ibérica (Figura 7.34 (a)).

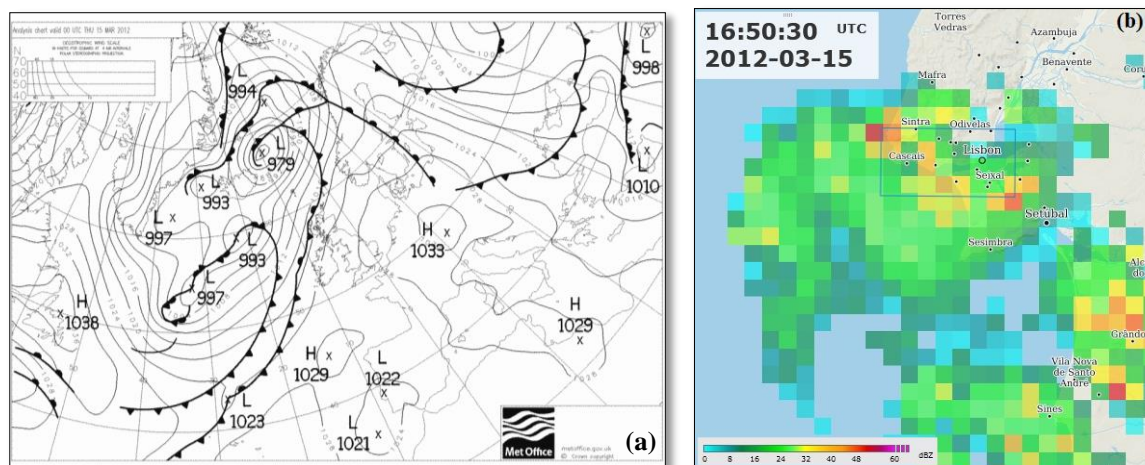


Figura 7.34 – (a) Carta da análise de superfície das 00 UTC de dia 15 de março de 2012 (MetOffice) e (b) produto MAX(Z), do radar de CCL, das 1650 UTC de dia 15 de março de 2012 (b).

A título de exemplo, ilustra-se na Figura 7.34 (b) a imagem radar do produto MAX(Z) das 1650 UTC de dia 15 de março de 2012. Para este dia, apenas o sensor de IGEO não tinha dados, pelo que foram utilizados os valores de PWV dos restantes quatro. O resultado da comparação entre o PWV e o mM(Z) é o ilustrado na Figura 7.35.

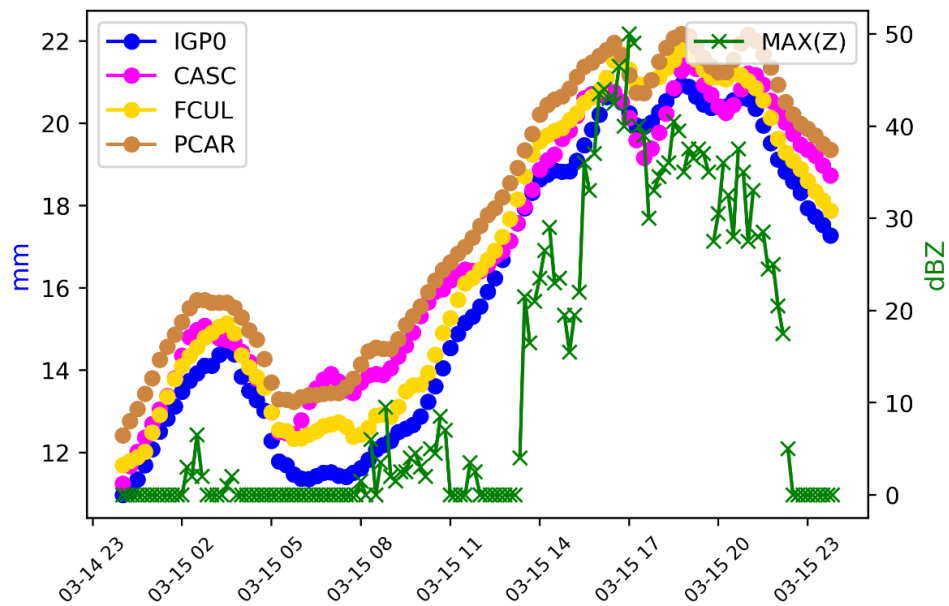


Figura 7.35 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGP0, CASC, FCUL e PCAR e os valores máximos do produto MAX(Z) para o dia 15 de março de 2012.

Neste caso, continua a existir uma concordância entre o  $mM(Z)$  e o PWV, e uma resposta mais tardia na curva de  $mM(Z)$  quando comparada com o início do aumento de valores de PWV. No primeiro pico de PWV, o primeiro valor de  $mM(Z)$  diferente de zero ocorre às 0210 UTC. No segundo pico, existe um acompanhamento inicial, mas os valores de  $mM(Z)$  voltam a diminuir, para mais tarde voltarem a acompanhar a curva de PWV com valores mais elevados de dBZ coerentes com valores mais elevados de PWV. De forma análoga, ao caso anterior, foram adicionados os valores de precipitação horária. O resultado é o ilustrado na Figura 7.36.

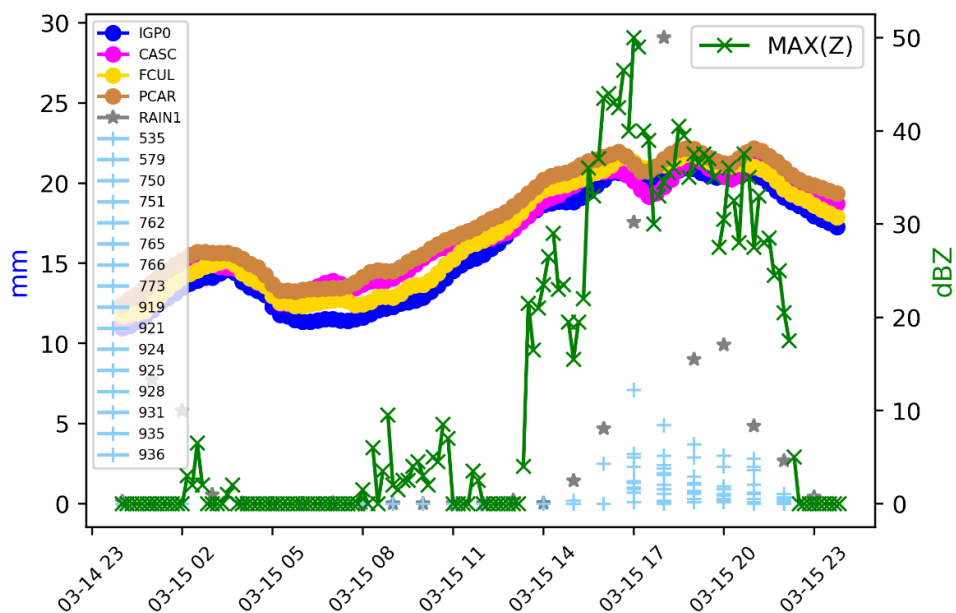


Figura 7.36 – Gráfico de PWV dos sensores GPS de IGP0, CASC, FCUL e PCAR, os valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o dia 15 de março de 2012.

No segundo pico, surgem às 1350 UTC valores da ordem de 20 dBZ, embora antecedendo naturalmente o início da precipitação, mas cerca de 5h depois do início da subida da curva de PWV. Conforme o caso anterior, os valores de precipitação estimados pelo radar são mais elevados quando comparados com os das estações automáticas.

### 7.5.4 Estudo de caso – 14 a 15 de agosto

A quarta situação avaliada, corresponde igualmente a um período de 24 horas, distribuído entre as 12 UTC do dia 14 e as 12 UTC de 15 de agosto de 2012. O tempo em Portugal Continental foi condicionado por um anticiclone localizado a sul do arquipélago dos Açores e que se estendia em crista até à Península Ibérica e pela passagem de uma frente fria na circulação de uma depressão situada a noroeste do Golfo da Biscaia Figura 7.37 (a). Na Figura 7.37 (b) o produto MAX(Z) das 0100 UTC, de dia 15 de agosto, a que corresponde a um dos instantes da passagem da superfície fria sobre a área de estudo.

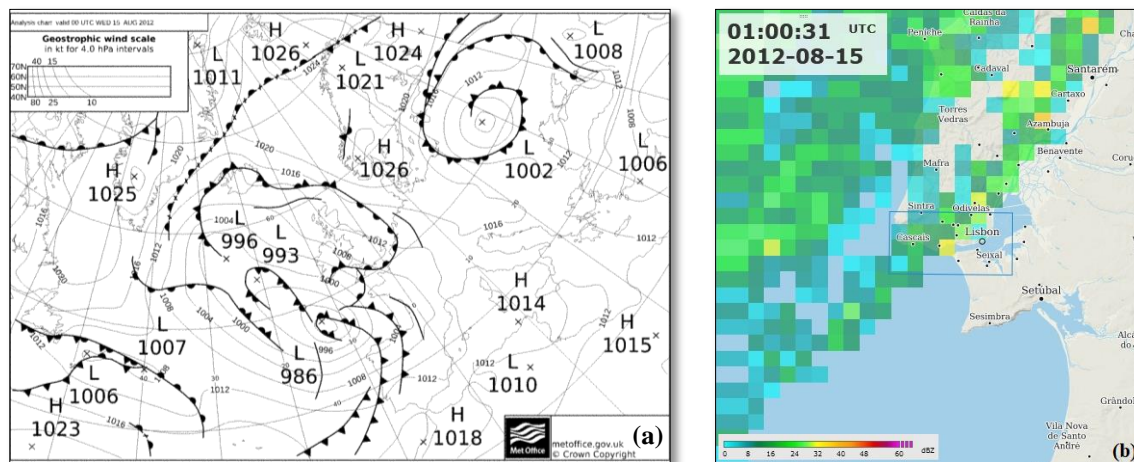


Figura 7.37 – (a) Carta da análise de superfície das 00 UTC de dia 15 de agosto de 2012 (*MetOffice*) e (b) produto MAX(Z), do radar de CCL, das 0100 UTC de dia 15 de agosto de 2012.

Neste intervalo, foram utilizados dados de PWV provenientes dos 5 sensores de GPS (o da FCUL a partir das 0015 UTC de dia 15) na comparação com os dados de mM(Z).

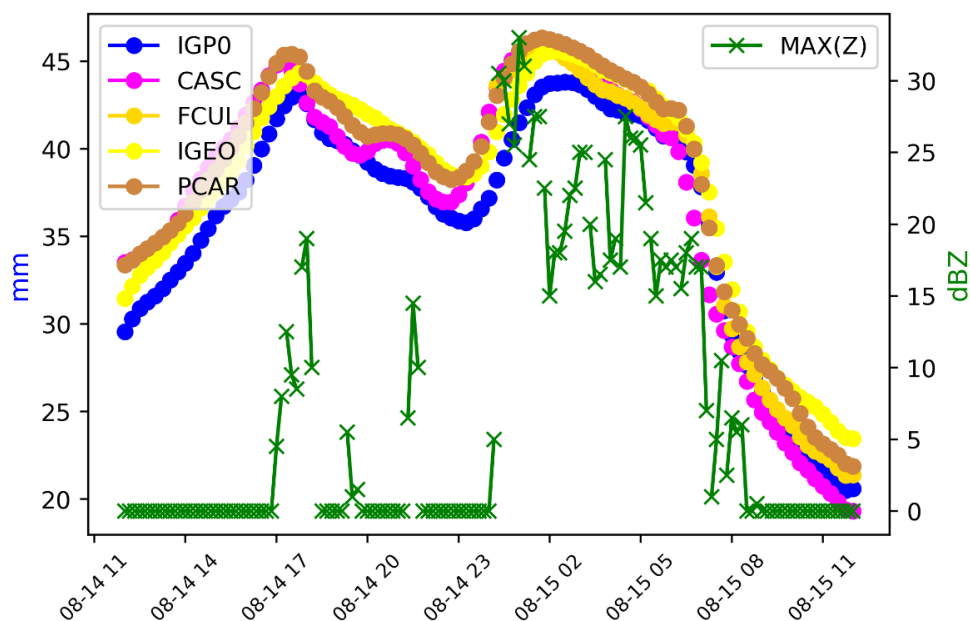


Figura 7.38 – Gráfico de PWV dos cinco sensores GPS e os valores máximos do produto MAX(Z) para o intervalo das 12 UTC de dia 14 de agosto às 12 UTC de dia 15 de agosto de 2012.

O segundo pico na curva do PWV na Figura 7.38 corresponde à passagem da frente fria, visível na imagem do produto MAX(X) das 01 UTC de dia 15 de agosto. Neste caso, a resposta dos valores de  $mM(Z)$  foi mais rápida, contudo, no primeiro pico, mantém-se o maior desfasamento.

Com os valores de precipitação acumulada em 1 hora, o gráfico anterior assume a forma ilustrada na Figura 7.39.

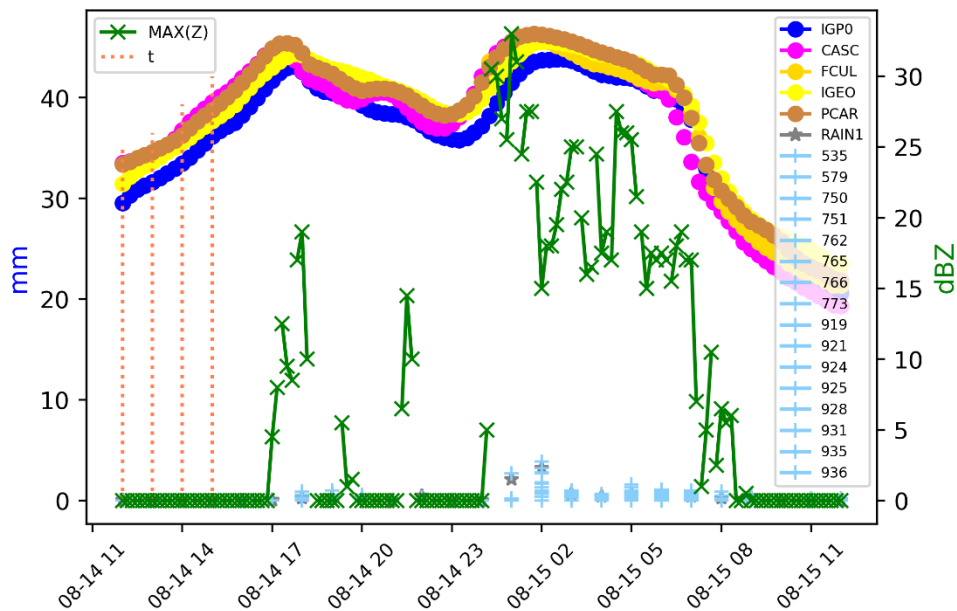


Figura 7.39 – Gráfico de PWV dos cinco sensores GPS, os valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o intervalo das 12 UTC de dia 14 de agosto às 12 UTC de dia 15 de agosto de 2012. Instantes das 12, 13, 14 e 15 UTC de dia 14 de agosto de 2012 identificados por barras verticais a tracejado cor-de-laranja.

Durante a passagem da frente fria, de fraca atividade, estiveram associados valores de precipitação baixos e que são concordantes com os valores da ordem dos 25 a 30 dBZ do produto MAX(Z), ou seja, inferiores a  $5 \text{ mmh}^{-1}$ . Este é um bom exemplo em que o  $mM(Z)$  acompanha os valores de PWV embora associado a um episódio de precipitação fraco.

Por outro lado, e considerando o primeiro pico de PWV que apresenta valores residuais de precipitação, foi possível identificar no campo de precipitação estimado pelo radar, valores ligeiramente mais elevados em outras regiões do continente que não na área em análise. Durante o segmento ascendente de PWV, antes do primeiro pico após as 17 UTC de dia 14, é possível visualizar nas imagens radar do produto RAIN1, regiões onde, potencialmente, ocorreu precipitação à superfície com valores da ordem dos 4 mm, mas com localizações a noroeste e a norte da área de estudo (Figura 7.40). Os instantes representados na Figura 7.40 correspondem aos instantes identificados às barras a tracejado cor-de-laranja na Figura 7.39.

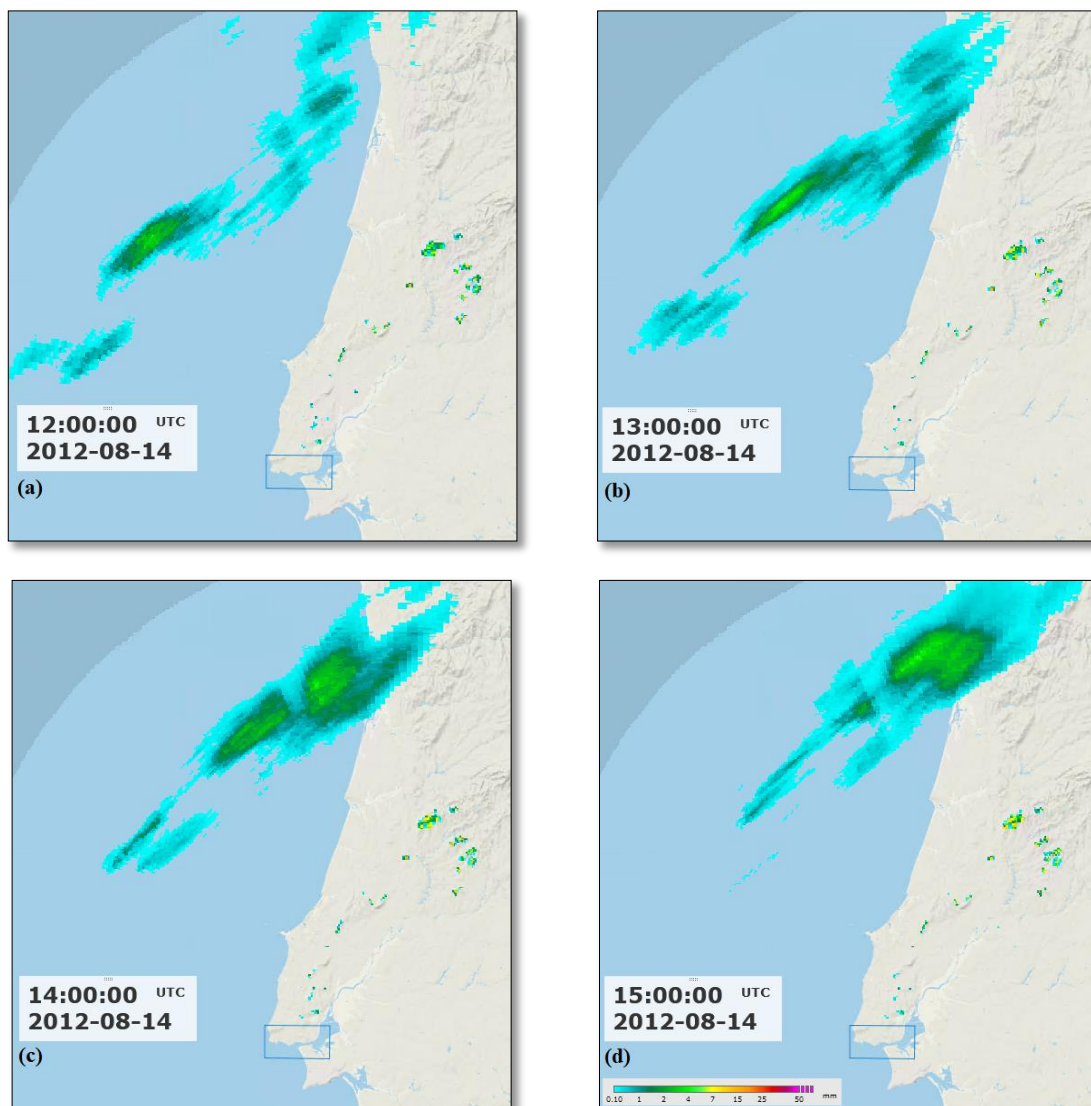


Figura 7.40 – Produto RAIN1, do radar de CCL, das (a) 12, (b) 13, (c) 14 e (d) 15 UTC de dia 14 de agosto de 2012.

A seguir às 17 UTC houve, de facto, valores residuais de precipitação sobre a região em estudo mas, o primeiro pico de PWV resultou em valores de precipitação um pouco mais elevados, embora no exterior da área em análise.

O próximo caso representa outro exemplo em que a informação radar poderá justificar o aumento de valores de PWV sem episódios de precipitação associados nas proximidades dos sensores de GPS.

### 7.5.5 Estudo de caso – 23 a 25 de agosto

É analisado o período de 72h entre as 00 UTC de dia 23 de agosto e as 24 UTC de dia 25 de agosto de 2012. Da informação PWV,  $mM(Z)$  e precipitação horária, das estações de superfície e radar, resulta o gráfico da Figura 7.41.

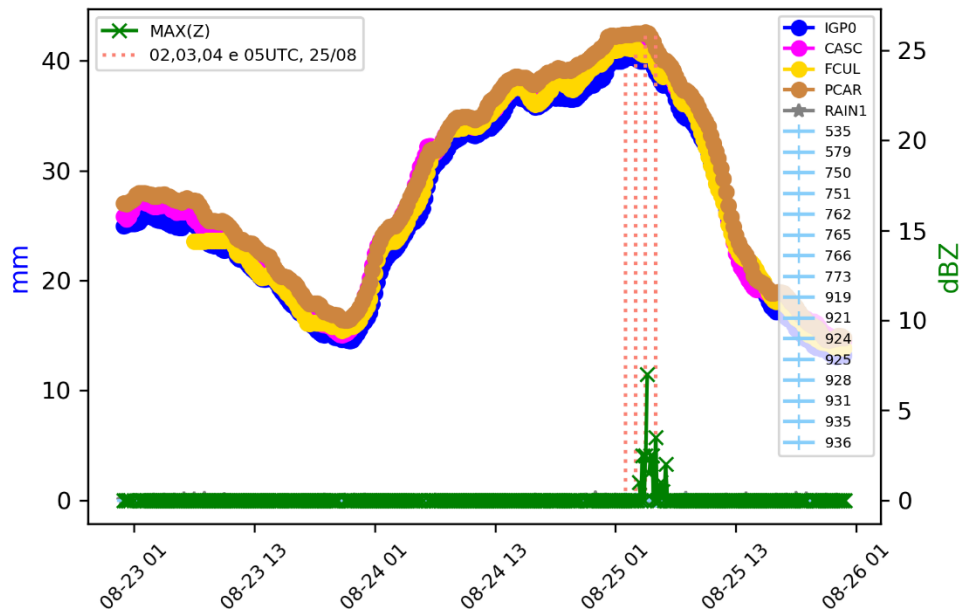


Figura 7.41 – Gráfico de PWV, valores máximos do produto MAX(Z) e precipitação horária das estações automáticas e do produto RAIN1, para o intervalo das 00 UTC de dia 23 de agosto às 24 UTC de dia 25 de agosto de 2012. Instantes das 02, 03, 04 e 05 de dia 25 de agosto de 2012 identificados por barras verticais a tracejado cor-de-laranja.

Os máximos de MAX(Z) manifestaram algum sinal, embora com valores baixos, durante o pico de PWV na madrugada de dia 25, e a precipitação horária foi praticamente nula. No entanto, são visíveis na Figura 7.42 por intermédio do produto RAIN1, para os instantes identificados na Figura 7.41, regiões a norte da área de estudo onde o radar estimou valores de precipitação não superiores a 1 mm.

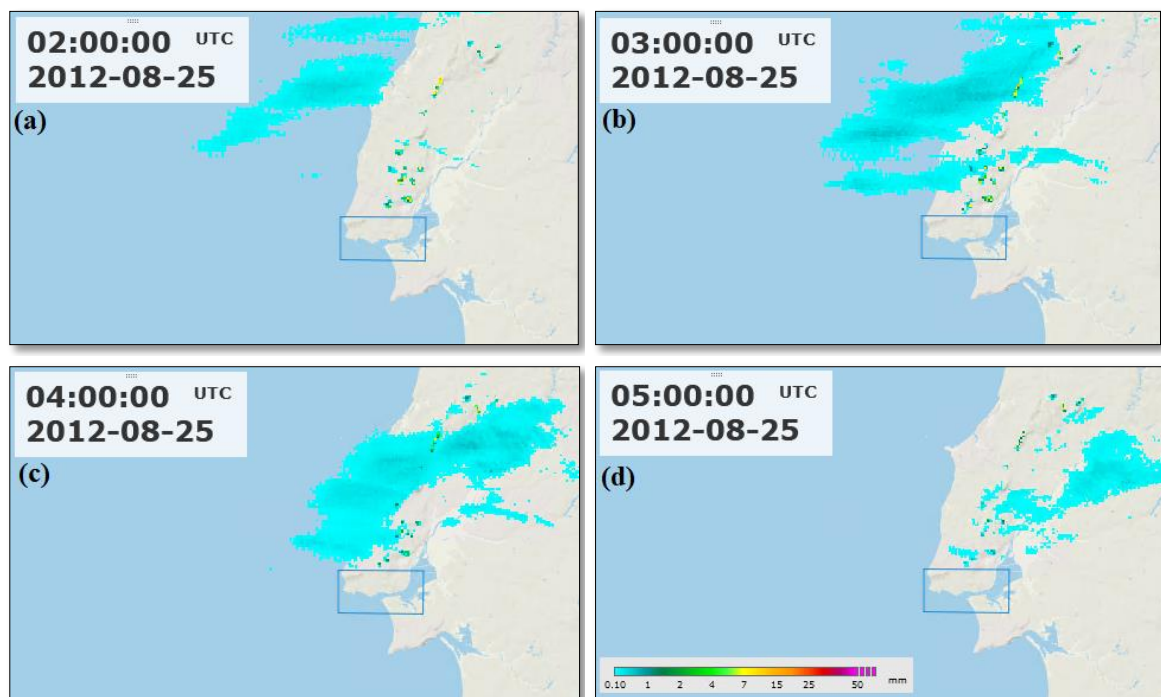


Figura 7.42 – Produto RAIN1 das (a) 02 UTC, (b) 03 UTC, (c) 04 UTC e (d) 05 UTC de 25 de agosto de 2012, do radar de CCL.

Este caso é um bom exemplo, onde um pico de PWV, da ordem dos 40 mm, esteve associado à ocorrência de precipitação, embora fraca, na vizinhança dos sensores de GPS mas não necessariamente sobre os sensores ou na sua proximidade. Da análise da precipitação horária, proveniente das estações de superfície e do radar, para este período e restrita à área em estudo, resulta valores residuais ou nulos (ver gráfico em 10.5), porém, uma extensão da área inicial, e por conseguinte da observação radar, permite associar um episódio de precipitação a um máximo relativo de PWV que de outra forma estaria associado a um falso alarme.

## 8. Conclusões e Trabalho futuro

No presente trabalho foi avaliada a possibilidade de sinergia entre informação proveniente dos sensores de GPS e do radar meteorológico. As principais conclusões são elencadas nos seguintes pontos.

Foi verificada a excelente concordância entre os valores de PWV e de TPW e avaliada a relação para períodos inferiores a 24h, sendo que a mesma continua a existir entre os dois parâmetros para períodos de 6h.

Com recurso a informação udométrica foi verificada a ocorrência de precipitação nos máximos de PWV e/ou na vertente descendente da curva. Contudo, em algumas situações com valores de PWV elevados esteve associada ausência de precipitação. Devido ao carácter pontual das estações de superfície, foi utilizado o campo de precipitação horária estimado pelo radar meteorológico. O produto RAIN1 reforçou os episódios de precipitação previamente registados com as estações de superfície, estimando por vezes valores ligeiramente superiores devido à vantagem de observação em área. Todavia, para a área em estudo, não foram acrescentadas novas situações precipitantes que justificassem os casos de valores mais elevados de PWV sem precipitação associada.

Foi mostrada a boa relação entre o PWV e o produto radar MAX(Z) sempre que ocorreram episódios de precipitação. Dos casos analisados, o aumento de valores de PWV antecede o aumento de valores de MAX(Z). Este desfasamento dever-se-á à duração do processo de transição de fase. Nestas condições, a informação proveniente do GPS “prevê” um evento de precipitação com maior antecedência quando comparada com a informação proveniente do radar meteorológico.

O PWV pode ajudar na previsão de episódios de precipitação, mas continua a existir uma taxa elevada de falsos alarmes. Em determinadas situações e sem limitação geográfica o radar meteorológico estimou valores de precipitação associados a variações de PWV o que pode contribuir (mas ligeiramente) para uma redução da taxa de falsos positivos.

Para que o PWV possa ser utilizado para fins de *nowcasting*, este deve ser integrado ou complementado com outras variáveis ou informação meteorológica.

Sobre o trabalho futuro, referir o seguinte. Será de considerar a expansão da área de estudo para que a mesma integre mais informação. Mais recetores GPS, potencialmente com informação derivada de outras redes GNSS, e, caso a área seja suficientemente extensa, mais radares meteorológicos da rede do continente (APG e LCC). Os sensores de GNSS, quando comparados com os sistemas de radar meteorológico, são muito menos dispendiosos, permitindo uma maior massificação e densidade

geográfica. Com recurso a uma rede de recetores GNSS mais densa, existe a possibilidade de criação de mapas de PWV para a integração com uma maior cobertura radar. Acrescentar que, está a decorrer a substituição dos radares de CCL e de LCC por radares de polarização dupla. Estes radares tornar-se-ão mais sensíveis à deteção de retro difusores e ficará disponível uma nova gama de variáveis provenientes da tecnologia de polarização dupla que poderá ser explorada.

A possibilidade de conjugação de informação PWV e do produto radar *Vertically Integrated Liquid* (VIL) para fins de previsão em situações de convecção profunda e, portanto, associadas a valores mais elevados de precipitação.

Por último, e mais desafiante, a utilização de informação do radar meteorológico para a recuperação de vapor de água extraindo a refratividade das medições de fase do radar.

## 9. Referências

- (CGIAR-CSI), CGIAR - Consortium for Spatial Information. 2004-2022. *SRTM 90m DEM Digital Elevation Database*. Acedido em 07 de 08 de 2022. <https://srtm.csi.cgiar.org/>.
- Adams, D. K., R. M. S. Fernandes, E. R. Kursinski, J. M. Maia, e Luiz A. Machado, Ícaro Vitorello, Kirk Holub, Seth Gutman, Naziano Filizola, Richard A. Bennett Luiz F. Sapucci. 2010. “Uma densa rede meteorológica GNSS para a observação de convecção profunda na Amazônia.” *INPE (Repositório)*. Acedido em 19 de 7 de 2022. <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.11.19.02/doc/v1.pdf>.
- Atlas, D. 1954. “The Estimation of Cloud Parameters by Radar.” *Journal of Meteorology* 11: 309-317.
- Baker, H. C., A. H. Dodson, N. T. Penna, M. Higgins, e D. Oler. 2001. “Ground-based GPS water vapour estimation: potential for meteorological forecasting.” *J Atmos Sol-Terr Phy*. 63:1305-1314.
- Barbosa, S., Á Silva, e P. Narciso. 2018. “Analysis of the 1 November 2015 heavy rainfall episode in Algarve by using weather radar and rain gauge data.” *Nat Hazards*, September, (Suppl 1) ed.: 61-76. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-017-3065-2>.
- Battan, L.J. 1973. *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago.
- Benevides, P., J. Catalao, e P.M.A. Miranda. 2015. “On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall.” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 2605–2616.
- Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, e R. H. Ware. 1994. “GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water.” *J Appl Meteorol.* 33:379-386.
- Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, e R.H. Ware. 1992. “GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System.” *J Geophys Res-Atmos.* 97:15787-15801.
- Blanchard, D. C. 1953. “Raindrop Size-Distribution in Hawaiian Rains.” *Journal of Meteorology* 457-473.
- Boniface, K., V. Ducrocq, G. Jaubert, X. Yan, P. Brousseau, F. Masson, C. Champollion, J. Chéry, e E. Doerflinger. 2009. “Impact of high-resolution data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecasting.” *Ann Geophys.* 27:2739-2753.
- Brown, E. N., e R. R., Jr. Braham. 1963. “Precipitation Particle Measurements in Cumulus Congestus.” *Journal of the Atmospheric Sciences* 20: 23-28.
- Champollion, C., C. Flamant, O. Bock, F. Masson, D. D. Turner, e T. Weckwerth. 2009. “Mesoscale GPS tomography applied to the 12 June 2002 convective initiation event of IHOP2002.” *Q J Roy Meteor Soc.* 135:645-662.
- Champollion, C., F. Masson, J. Van Baelen, A. Walpersdorf, J. Chéry, e E. Doerflinger. 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.
- CIGeoE. 2013. *SERVIR*. Acedido em 2022 de 08 de 15. <https://www.igeoe.pt/index.php?id=45>.
- dgT. 2022. *PT-TM06/ETRS89*. Acedido em 15 de 08 de 2022. <https://www.dgterritorio.gov.pt/geodesia/sistemas-referencia/portugal-continental/PT-TM06-ETRS89>.
- . 2022. *Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS*. Acedido em 14 de 08 de 2022. <https://renep.dgterritorio.gov.pt/>.
- Duan, J., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, et al. 1996. “GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water.” *J. Appl. Meteorol.*, 35 830-838.
- e2p. 2022. *energias endógenas de portugal*. Acedido em 17 de julho de 2022. <https://e2p.inegi.up.pt/index.asp>.
- ECMWF. 2020. “ECMWF starts assimilating COSMIC-2 data.” *Newsletter, Number 163 - Spring 2020*, April.
- Espírito Santo, F., N. Moreira, A. Silva, I. Novo, P. Narciso, M.J. Lopes, e T. Cota. 2016. *Episódio de tempo adverso no interior do Alentejo e Algarve 23 a 25 de outubro de 2016*. Internal report, Lisboa: IPMA.
- EUMeTrain. 2014. *Chapter II: Retrieving the Atmospheric Water Content*. Acedido em 13 de 08 de 2022. [https://resources.eumetrain.org/data/3/359/print\\_2.htm](https://resources.eumetrain.org/data/3/359/print_2.htm).
- EUSPA. 2022. *What is SBAS?* 12 de 08. Acedido em 15 de 8 de 2022. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>.
- Guergana Guerova, Jonathan Jones, Jan Douša, Galina Dick, Siebren de Haan, Eric Pottiaux, Olivier Bock, Rosa Pacione, Gunnar Elgered, Henrik Vedel, and Michael Bender. 2016. “Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe.” *Atmos. Meas. Tech.* 5385–5406. doi:10.5194/amt-9-5385-2016.
- Hanssen, R. F. 2002. “Atmospheric monitoring. In Radar interferometry. Remote sensing and digital image processing.” Em *Radar Interferometry - Data Interpretation and Error Analysis*, de R. F. Hanssen, 197-245. Springer, Dordrecht. doi:[https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9\\_6](https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9_6).
- IPMA. 2012. *Boletim Climatológico Anual, 2012, Portugal continental*. Lisboa: IPMA.
- Jain, M., S. Manandhar, Y. H. Lee, S. Winkler, e S. Dev. 2020. “Forecasting Precipitable Water Vapor Using LSTMs.” *arxiv*. 26 de June. Acedido em 05 de 09 de 2022. <https://arxiv.org/pdf/2006.15165.pdf>.
- Jones, D. M. A. 1956. *Rainfall Drop Size-Distribution and Radar Reflectivity*. Research Report, Illinois State Water Survey Meteorologic Laboratory, University of Illinois, Urbana, Illinois: Signal Corps Engineering Laboratories, 20.
- Karabatić A, Weber R, Haiden T. 2011. “Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria.” *Advances in Space Research.* 47(10):1691-1703. doi:10.1016/j.asr.2010.10.028.

- Kazuaki Imaoka, Takeshi Higashino, Minoru Okada. 2019. "Investigation of Rainfall Forecasting Using the Difference of GNSS Zenith Total Delay with Elevation Cut-off Angles." *IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. 1056 - 1058.
- Khaniani, A. S., H. Motieyan, e A. Mohammadi. 2021. "Rainfall forecast based on GPS PWV together with meteorological parameters using neural network models." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 17 de January. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105533>.
- Li, L. 2018. "<https://research.vu.nl/en/publications/chasing-water-in-the-atmosphere-the-sources-transport-paths-amoun-2>." *Chasing water in the Atmosphere: The sources, transport paths, amount, and signals favouring rainfall*. 18 de 06. Acedido em 11 de 08 de 2022.
- Manning, T., K. Zhang, W. Rohm, S. Choy, e F. Hurter. 2012. "Detecting Severe Weather using GPS Tomography: An Australian Case Study." *Journal of Global Positioning Systems*. 11(1):58-70. doi:10.5081/jgps.11.1.58.
- Marshall, J. S., e W. Mck. Palmer. 1948. "The distribution of raindrops with size." *Journal of Meteorology*, August: 5:165-166.
- Martins, J.P.A, R. Fernandes, H. Valentim, M Bos, C. Barroso, A. Ramos, P. Viterbo, e A. Sá. 2017. "Comparação de Produtos de Vapor de Água Precipitável sobre a Península Ibérica." *10º Simpósio da APMG*. Lisboa.
- Mateus, P., G. Nico, e J. Catalão. 2014. "Maps of PWV Temporal Changes by SAR Interferometry: A Study on the Properties of Atmosphere's Temperature Profiles." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11 (12): 2065-2069.
- Mendes, V.B. 2022. "Fontes de Erro." Em *Sistema de Posicionamento Global*, de V. B. Mendes. Lisboa: FCUL.
- Miranda, P. M. A., e P. Mateus. 2021. "A New Unconstrained Approach to GNSS Atmospheric Water Vapor Tomography." *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL094852. doi: <https://doi.org/10.1029/2021GL094852>.
- Miranda, P. 2001. *Meteorologia e Ambiente*. Lisboa: Universidade Aberta.
- Narciso, P., Á. Silva, N. Moreira, e D. Diogo. 2016. "Estimativa de precipitação radar-udómetro para casos recentes de precipitação intensa na região de Lisboa." *International Conference on Urban Risks*. Lisboa. 347-354.
- Nature. 1943. "Radio Detection And Ranging." 2 de 10: 391-392. doi:<https://doi.org/10.1038/152391b0>.
- Office, Met. 2022. *Surface pressure charts*. Acedido em 16 de Julho de 2022. <https://www.metoffice.gov.uk/weather/maps-and-charts/surface-pressure>.
- Peixoto, J. P. 1995. "The role of the atmosphere in the water cycle." Em *The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change*, de NATO ASI Series. Springer.
- Probert-Jones, J. R. 1962. "The radar equation in meteorology." *Q. J. R. Meteorological Society* 88 (378): 485-495. doi:<https://doi.org/10.1002/qj.49708837810>.
- QZSS. 2022. *Quasi-Zenith Satellite Orbit*. Acedido em 17 de 7 de 2022. <https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>.

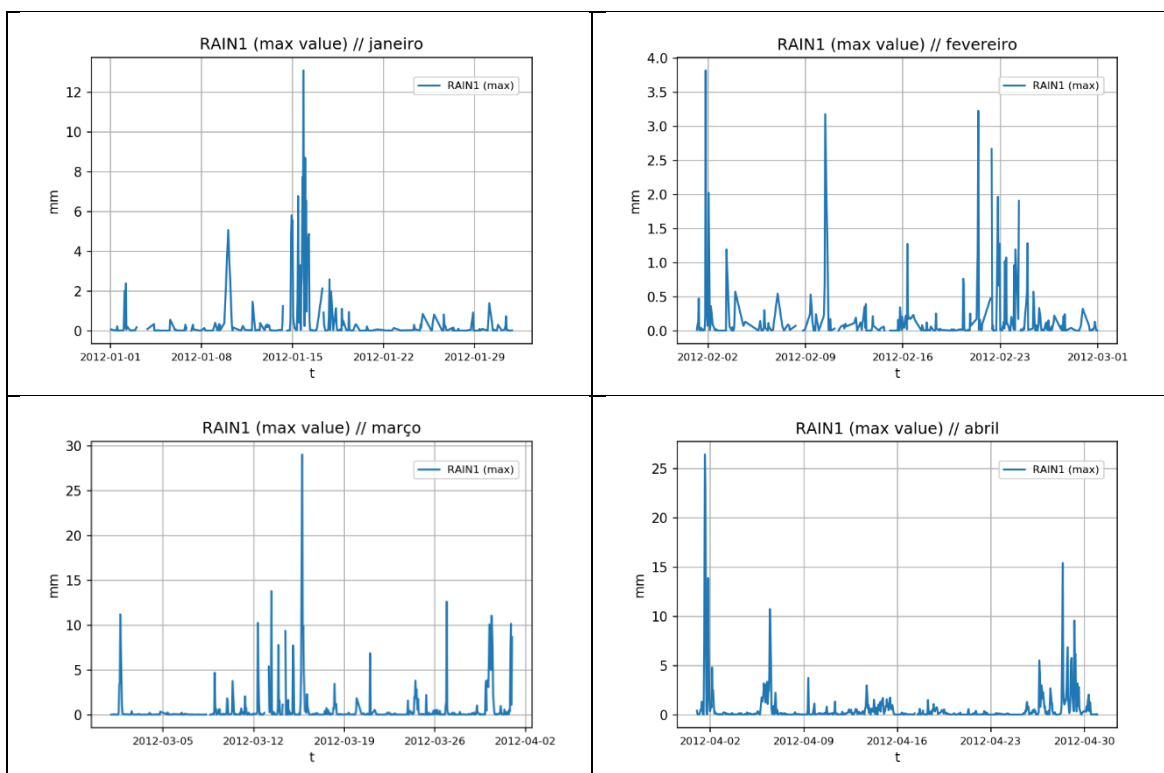
- Resources, eo - Sharing Earth Observation. 2022. *eoPortal Directory*. Acedido em 17 de 7 de 2022. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/cnss>.
- Saastamoinen, J. 1972. "Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The use of artificial satellites for Geodesy." 247–251.
- SAF, ROM. 2022. *EUMETSAT, ROM SAF, Radio Occultation Meteorology*. Acedido em 10 de 07 de 2022. <https://www.romsaf.org/>.
- Silver, S. 1949. *Microwave antenna theory and design*. New York, Toronto, London.: McGraw-Hill book company, inc.
- Tregoning, P., R. O'Brien, e M. Hendy. 1998. "Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations." *Journal of Geophysical Research*, 27 de November: 28, 701-28, 710.
- Van Baelen, J., M. Reverdy, F. Tridon, L. Labbouz, G. Dick, M. Bender, e M. Hagen. 2011. "On the relationship between water vapour field evolution and the life cycle of precipitation systems." *Q J R Meteorol Soc*. 137:204-223. doi:10.1002/qj.785.
- Wallace, J.M., e P.V. Hobbs. 2006. *Atmospheric Science - An Introductory Survey*. Elsevier Inc.
- Wallace, J.M., Hobbs, P.V. 2006. *Atmospheric Science, An Introductory Survey*. Elsevier Inc. doi:<https://doi.org/10.1016/C2009-0-00034-8>.
- Wetterzentrale. 2022. *Wetterzentrale Archiv*. Acedido em 16 de julho de 2022. <https://www.wetterzentrale.de>.
- Wyoming, University of. 2022. *University of Wyoming, College of Engineering, Department of Atmospheric Science*. Acedido em 10 de julho de 2022. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Yano, J. I., M. Z. Ziemiański, M. Cullen, P. Termonia, J. Onvlee, L. Bengtsson, A. Carrassi, et al. 2018. "Scientific challenges of convective-scale numerical weather prediction." *Bulletin of the American Meteorological Society* 99 (4). pp. 699-710. doi:<https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0125.1>.
- Yue, X., W. S. Schreiner, N. Pedatella, R. A. Anthes, A. J. Mannucci, P. R. Straus, e J.-Y. and Liu. 2014. "Space Weather Observations by GNSS Radio Occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2." *Space Weather* 12, 616– 621. doi:10.1002/2014SW001133.
- Zhang, Q., Junhua Ye, S. Zhang, e F Han. 2018. "Precipitable Water Vapor Retrieval and Analysis by Multiple Data Sources: Ground-Based GNSS, Radio Occultation, Radiosonde, Microwave Satellite, and NWP Reanalysis Data." *Journal of Sensors*, 13. doi:<https://doi.org/10.1155/2018/3428303>.
- Zhao, Q., Y. Yao, e W Tao. 2018. "GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 124-133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.013>.

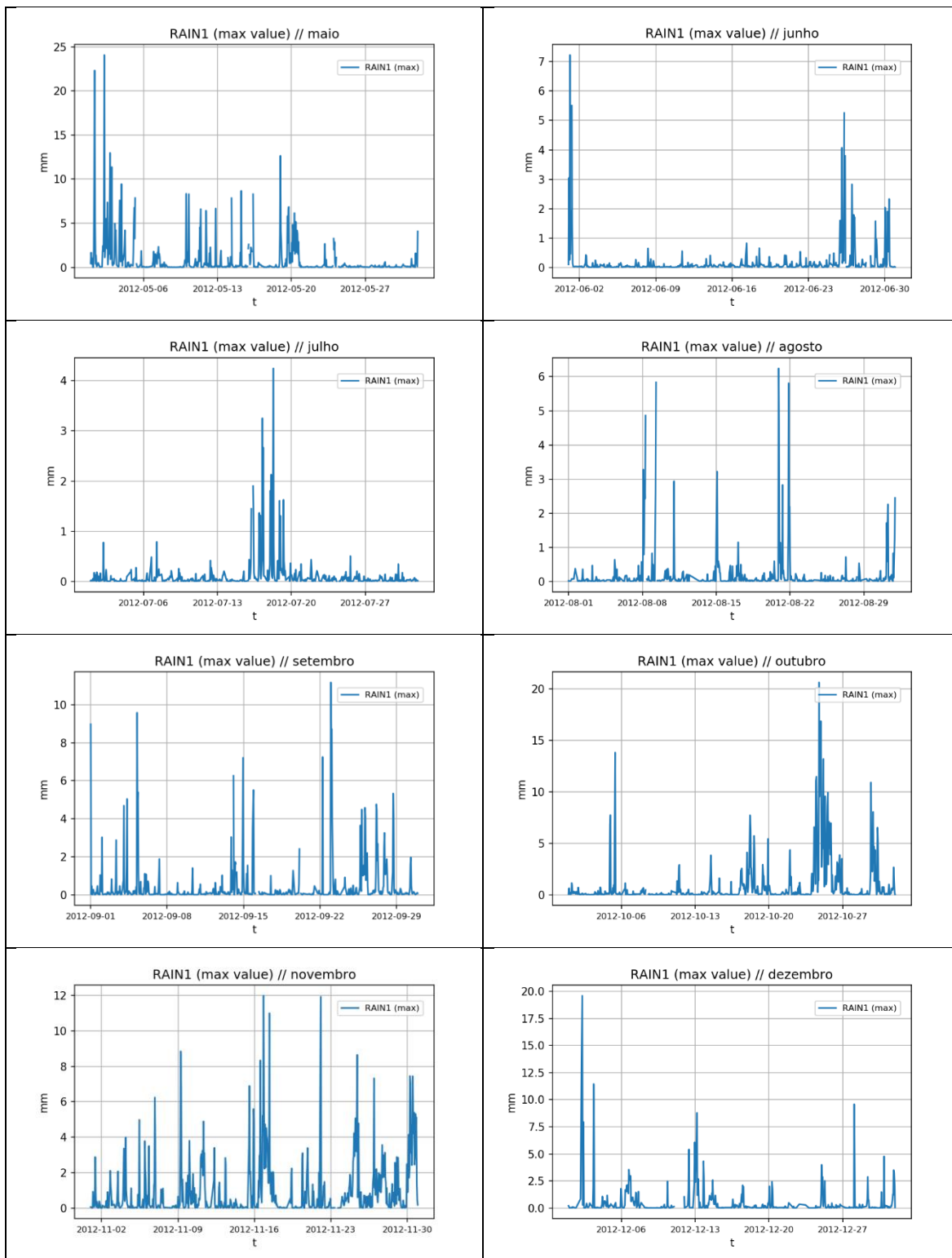
## 10. Anexos

### 10.1 Anexo I – Valores filtrados do produto RAIN1 do radar de CCL

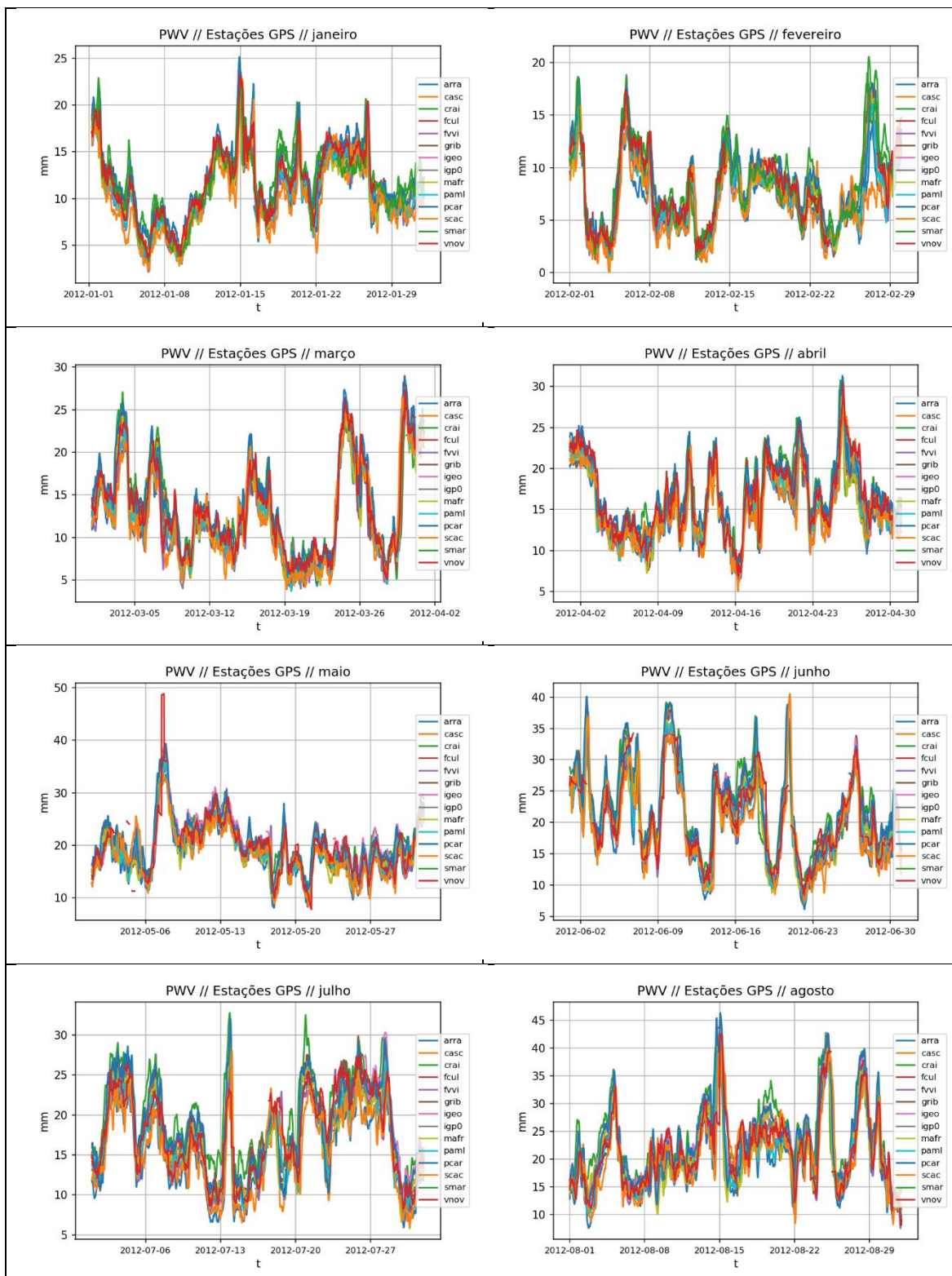
Data	Hora (UTC)	Valor (mm)	Data	Hora (UTC)	Valor (mm)
06-jan	21	14,88	24-mai	07	17,02
17-jan	08	9,06	01-jun	06	45,68
11-fev	08	7,93	25-jun	00	14,58
22-fev	08	12,99	26-jun	08	12,34
24-fev	09	6,37	16-jul	06	12,68
24-fev	10	5,76	16-jul	07	20,03
14-mar	07	40,53	16-jul	08	7,85
14-mar	09	18,02	08-ago	08	11,36
14-mar	10	39,91	08-ago	09	21,68
13-mai	23	10,26	09-ago	08	12,26
14-mai	07	31,16	09-ago	09	18,74
15-mai	21	12,92	01-set	01	13,41
16-mai	00	26,70	14-set	01	58,06
16-mai	07	41,58	14-set	08	12,42
16-mai	08	17,15	16-set	09	30,38
23-mai	23	11,13			

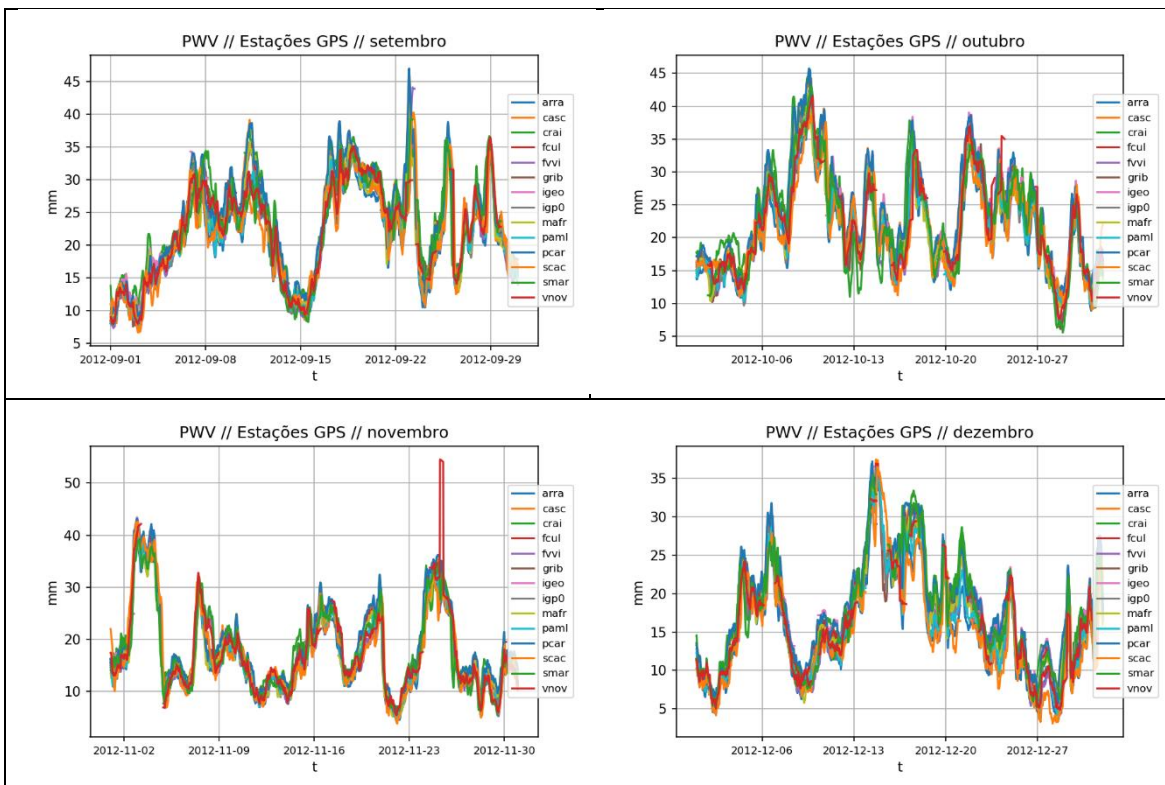
### 10.2 Anexo II – Variação mensal dos valores máximos de RAIN1 para o ano de 2012



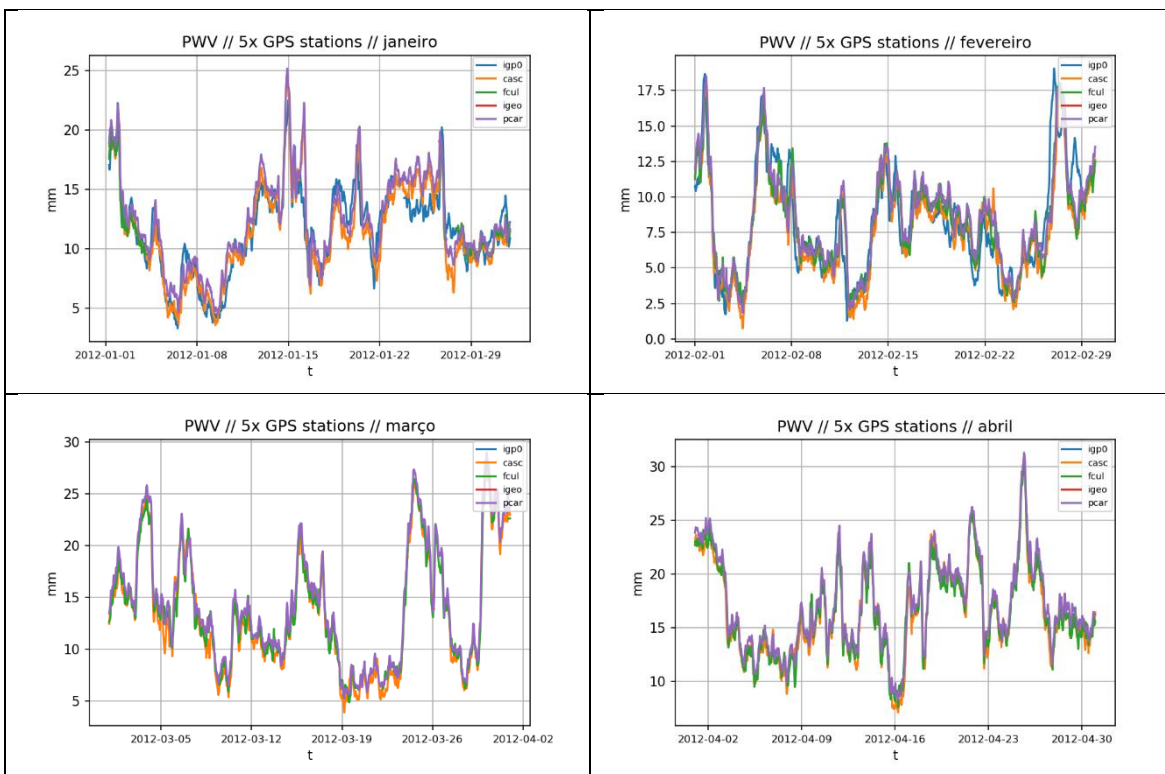


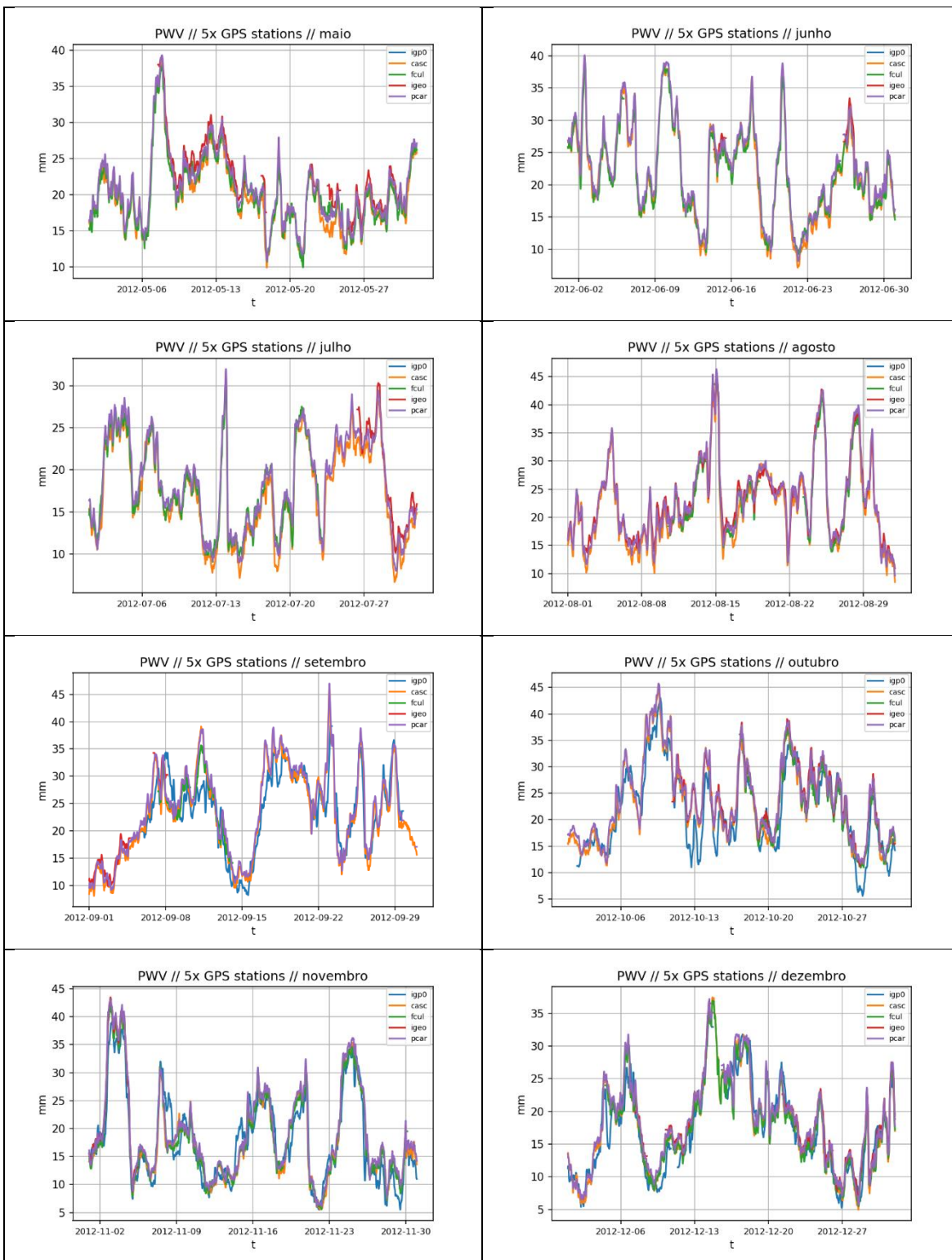
### 10.3 Anexo III – Variação mensal de PWV de todas as estações GPS para o ano de 2012





**10.4 Anexo IV – Variação mensal de PWV das 5 estações GPS (IGP0, CASC, FCUL, IGEO, PCAR) no ano de 2012**





### 10.5 Anexo V – Comparação dos valores mensais de precipitação horária registrada nas estações de superfície e a estimada pelo radar meteorológico.

