

A Nossa  
Universidade

Colégio dos Jesuítas  
Rua dos Ferreiros - 9000-082, Funchal

Tel: +351 291 209400  
Fax: +351 291 209410  
Email: gabinetedareitoria@uma.pt

DM

Estudo do Efeito do Vento na Quantificação  
da Precipitação na Ilha da Madeira  
Sílvia Sofia Leça Sousa



## Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Sílvia Sofia Leça Sousa**  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

  
UNIVERSIDADE da MADEIRA  
*A Nossa Universidade*  
www.uma.pt

setembro | 2013

**DIMENSÕES:** 45 X 29,7 cm

**PAPEL:** COUCHÊ MATE 350 GRAMAS

**IMPRESSÃO:** 4 CORES (CMYK)

**ACABAMENTO:** LAMINAÇÃO MATE

**NOTA\***

Caso a lombada tenha um tamanho inferior a 2 cm de largura, o logótipo institucional da Uma terá de rodar 90°, para que não perca a sua legibilidade/identidade.

Caso a lombada tenha menos de 1,5 cm até 0,7 cm de largura o layout da mesma passa a ser aquele que consta no lado direito da folha.



# **Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Sílvia Sofia Leça Sousa**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Susana Luísa Rodrigues Nascimento Prada

CO-ORIENTADOR

Celso Orlando Neves Figueira



**UNIVERSIDADE DA MADEIRA**

**CENTRO DE COMPETÊNCIA DE CIÊNCIAS EXACTAS E DA ENGENHARIA**

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da  
Precipitação na Ilha da Madeira**

**Sílvia Sofia Leça Sousa**

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do Grau de  
Mestre em **Engenharia Civil**

Júri:

João Paulo Martins

Sérgio António Neves Lousada

Victor Manuel Martins Soares Prior

Susana Luísa Rodrigues Nascimento Prada

UMa, Setembro 2013



## **Agradecimentos**

Aos meus pais, irmão e avós pela educação e esforço para poder alcançar esta nova etapa da minha vida.

Ao Sérgio Silvestre e família pelo apoio e incentivo que sempre demonstraram.

À minha orientadora Susana Prada e ao Celso Figueira pela ajuda, amizade e disponibilidade para que este trabalho não fosse em vão.

Ao Nuno Aguiar pela ajuda na realização deste trabalho.

À Doutora Rita Vasconcelos pela ajuda e pelo seu tempo despendido na elaboração deste estudo.

Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) que permitiu a colocação dos equipamentos nas áreas em estudo e pela cedência de dados essenciais à realização deste trabalho.

A todos os docentes e profissionais que contribuíram para a minha evolução académica e pessoal.

A todos os colegas que me apoiaram e fizeram ver que, para além da formação, a amizade também é essencial para o crescimento interior de um ser.



## Resumo

Precipitação é toda a forma de deposição de água que cai na superfície terrestre, excluindo aquela que se deposita por nevoeiros, condensação do vapor de água e geada. A medição pontual de precipitação usando udógrafos, durante um determinado período de tempo, tem por objetivo obter uma amostra significativa da queda de precipitação numa determinada área limitada, para poder ser usada em estudos hidrológicos necessários ao planeamento dos recursos hídricos e conceção de todo o tipo de projetos de Engenharia. Estudos efetuados por todo o mundo afirmam que o efeito do vento é o erro tem maior influência na medição de precipitação de um determinado local.

Neste estudo será realizado a análise do efeito do vento na medição da quantidade da precipitação, em dois locais da ilha da Madeira (Pico do Areeiro e Funchal), com o objetivo de encontrar uma equação do fator corretivo de precipitação, recorrendo a análise estatística ANOVA do SPSS. A recolha dos dados para a elaboração deste estudo processou-se de Outubro de 2011 até Abril de 2013.

Os resultados demonstraram que o udógrafo ao nível do solo regista um maior número de eventos de superior registo de precipitação do que udógrafo do IPMA, situado a 1,5 m de altura acima do solo. No entanto, existe maior registo quantitativo de precipitação no udógrafo do IPMA, comparativamente com o udógrafo do solo. A ocorrência deste último facto poderá dever-se a possíveis erros no registo/medição de precipitação.

Na estimativa das equações do fator corretivo de precipitação ( $k$ ) do Pico do Areeiro e do Funchal, através da análise ANOVA do SPSS, chegou-se à conclusão que, o fator corretivo de precipitação do Pico do Areeiro depende da intensidade de precipitação e da velocidade do vento contudo, o fator corretivo de precipitação do Funchal depende, exclusivamente da intensidade de precipitação.

**Palavras-Chave:** Precipitação, medição pontual, udógrafo, fator corretivo, velocidade do vento, intensidade da precipitação.

## Abstract

Precipitation is any form of deposition of water drops on the land surface, excluding that which is deposited through contact of one surface by mist, water's condensation and frosting. The punctual precipitation's measurement, using pluviometers during a certain period of time, got as main objective to get representative sample of precipitation's fall in a given limited area for it to be used in hydrological studies required for water resource planning and designing all sorts of engineering projects. Studies carried out throughout the world claim the wind effect is the error that has a greater influence on the on the precipitation's measurement in a particular site.

This study will analyze the effect of the wind on the measurement of the amount of rainfall at two locations on Madeira's island (Funchal and Pico do Areeiro), aiming to find an equation of the corrective factor of precipitation, using ANOVA's SPSS. The collection of data for the preparation of this study was processed from October 2011 until April 2013.

The results showed that, the pluviometer at ground level recorded a greater number of events of higher amount of precipitation than IPMA's pluviometer, placed 1.5 m above the ground level. However, there is a higher quantitative precipitation's registration of IPMA's pluviometer comparatively with the pluviometer placed at the ground level. The occurrence of this latter fact may be due to possible errors in precipitation's recording/ measurement.

In estimation of the corrective factor(  $k$  ) of precipitation's equations of Pico do Areeiro and Funchal by ANOVA's SPSS, came to the conclusion that, the Pico do Areeiro' s corrective factor for rainfall depends on the intensity of precipitation and the intensity of the wind. However, corrective factor for precipitation of Funchal relies, exclusively, on precipitation's intensity.

**Keywords:** Precipitation, punctual precipitation measurement, gauge, corrective factor, intensity of precipitation, intensity of the wind.

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ANOVA	<i>ANalysis Of VAriance</i>
c	Coefficiente referente ao aparelho medidor
CIMO	<i>Commission for Instruments and Methods of Observation</i>
cm	Centímetros
cm <sup>2</sup>	Centímetros quadrados
CVI	Complexo Vulcânico Inferior
CVM	Complexo Vulcânico Intermédio
CVS	Complexo Vulcânico Superior
D	Rácio de perdas de precipitação
EUA	Estados Unidos da América
i	Ângulo da queda de precipitação em comparação com a superfície do solo
I <sub>p</sub>	Intensidade da precipitação
IPMA	Instituto Português do Mar e Atmosfera
m	Metros
Ma	Milhões de anos
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
P <sub>c</sub>	Precipitação captada pelos aparelhos
P <sub>E</sub>	Precipitação proveniente de Este
P <sub>g</sub>	Precipitação medida pelo udógrafo
P <sub>k</sub>	Precipitação corrigida

$P_H$	Precipitação que cai na vertical
$P_N$	Precipitação proveniente de Norte
$P_S$	Precipitação proveniente de Sul
$P_T$	Total de precipitação esperada tendo em conta as cinco direções de vento.
$P_V$	Medição de precipitação esperada tendo em conta as 4 direções principais do vento.
$P_W$	Precipitação proveniente de Oeste
$\Delta P_{1-4}$	Correções associadas à humidade existente nas paredes internas do udógrafo e nas básculas, à evaporação, aos salpicos das gotas da chuva para dentro ou para fora do udógrafo e pela queda de neve.
$\Delta P_r$	Erros aleatórios observacionais e instrumentais
k	Fator corretivo tendo em conta o efeito do vento
km/h	Quilómetros por hora
R	Rácio de captação de precipitação
$R^2$ ou $r^2$	Coeficiente de determinação
SPSS	<i>Statistical Package for Social Science</i>
$v_v$	Velocidade do vento medido a 10 metros de altura
$v_{vg}$	Velocidade do vento ao nível da boca do aparelho
[-]	Unidimensional
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

# Índice

<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1. Objetivos .....	3
2. Organização da tese .....	4
<b>Capítulo I: Caraterização geral da ilha da Madeira</b> .....	<b>5</b>
I.1. Geomorfologia e descrição geológica geral.....	5
I.2. Climatologia .....	8
I.2.1. Caraterização do clima da ilha da Madeira.....	8
I.2.1.1. Temperatura média do ar.....	9
I.2.1.2. Precipitação .....	10
I.2.1.3. Vento .....	12
I.2.1.4. Humidade relativa do ar .....	13
I.2.1.5. Nebulosidade .....	14
I.3. Vegetação.....	15
I.4. Recursos hídricos.....	16
I.4.1. Usos da água subterrânea .....	18
<b>Capítulo II: Equipamento de medição da precipitação</b> .....	<b>19</b>
II.1. Equipamentos para medição de precipitação .....	19
II.1.1. Radares meteorológicos.....	19
II.1.2. Udómetros e udógrafos .....	20
II.1.2.1. Udómetro (ou pluviómetro).....	20
II.1.2.2. Udógrafos (ou pluviógrafos) .....	21
II.1.2.2.1. Sifão .....	21
II.1.2.2.2. Recetáculos basculantes.....	22
<b>Capítulo III: Modelos de correção da precipitação</b> .....	<b>25</b>
III.1. Introdução .....	25
III.2. Registo de precipitação e erros associados .....	25
III.3. Modelos de comparação e correção de precipitação.....	30

III.3.1. Correção de precipitação para diferentes tipos de udómetros / udógrafos .....	30
III.3.1.1. Comparação I – precipitação (1955 – 1975).....	31
III.3.1.2. Comparação II – precipitação (1972 – 1976).....	31
III.3.1.3. Comparação IV – intensidade de precipitação (2004-2008) ..	31
III.3.2. Equações de correção de precipitação.....	33
III.3.2.1. Organização Mundial de Meteorologia (WMO).....	33
III.3.2.2. Yang <i>et al.</i> (1998) e Yang <i>et al.</i> (2001).....	34
<b>Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal.....</b>	<b>39</b>
IV.1. Introdução.....	39
IV.2. Metodologia e materiais .....	39
IV.2.1. Áreas de registo de precipitação.....	39
IV.2.1.1. Pico do Areeiro .....	39
IV.2.1.2. Funchal.....	40
IV.2.2. Registo da precipitação.....	41
IV.2.2.1. Comparação entre registos de precipitação e formulação de equações .....	41
IV.3. Resultados e Discussão.....	44
IV.3.1. Comparação entre registos de precipitação.....	44
IV.3.1.1. Pico do Areeiro .....	44
IV.3.1.2. Funchal.....	48
IV.3.1.3. Observações.....	51
IV.3.2. Equações de correção de precipitação .....	53
IV.3.3. Análise ANOVA .....	57
<b>Capítulo V: Conclusões e perspetivas futuras .....</b>	<b>61</b>
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO A: Especificações dos equipamentos de medição de precipitação .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO B: Avaliação SPSS dos dados do Pico do Areeiro .....</b>	<b>70</b>

## **Índice de Figuras**

<b>Figura 1.</b> Representação do ciclo hidrológico (USGS, 2013).....	2
<b>Figura 2.</b> Relevo da ilha da Madeira (Santos <i>et al.</i> , 2006: 12) .....	6
<b>Figura 3.</b> Temperatura média anual entre 1961 - 90 (Santos <i>et al.</i> , 2006: 13).....	10
<b>Figura 4.</b> Precipitação média anual na ilha da Madeira (Prada <i>et al.</i> , 2003: 10) .....	11
<b>Figura 5.</b> Precipitações médias mensais na ilha da Madeira expressas em percentagem de precipitação média anual (Prada <i>et al.</i> , 2003: 10).....	12
<b>Figura 6.</b> Medição de valores médios anuais da velocidade (km/h) (linha azul escura) e direção (frequência - %) (linha azul clara) do vento medidos no Funchal entre o período 1961 - 1990 (Santos <i>et al.</i> , 2006: 17) .....	13
<b>Figura 7.</b> Mecanismo de formação de nuvens e nevoeiros orográficos na Madeira – Efeito Föhn (Figueira, 2009: 23).....	15
<b>Figura 8.</b> Bacias hidrográficas e cursos de água existentes na ilha da Madeira (Figueira, 2009: 19) .....	17
<b>Figura 9.</b> Modelo hidrogeológico da ilha da Madeira (Prada <i>et al.</i> , 2005: 11) .....	17
<b>Figura 10.</b> Esquema de udómetro com: a) funil; b) cone invertido de Nipher (Lencastre <i>et al.</i> , 2006: 48).....	21
<b>Figura 11.</b> Udógrafo de sifão (Lencastre <i>et al.</i> , 2006: 50).....	22
<b>Figura 12.</b> Princípio de funcionamento do udógrafo com recipientes basculantes (Lencastre <i>et al.</i> , 2006: 49) .....	23
<b>Figura 13.</b> Mecanismo registador de um udógrafo com recipientes basculantes: (A) suporte; (B) cilindro registador e (C) mecanismo de recipientes basculantes (Lencastre <i>et al.</i> , 2006: 49) .....	23
<b>Figura 14.</b> Udógrafo de funil protegido por uma rede para evitar erros no registo da quantidade de precipitação.....	24
<b>Figura 15.</b> Pormenor do sistema de recipientes basculantes, do mecanismo magnético de registo da precipitação e do <i>data logger</i> . .....	24
<b>Figura 16.</b> Diferentes recipientes de registo de precipitação. As linhas contínuas representam as linhas de fluxo do vento e as linhas a tracejado demonstram a	

trajetória que as partículas de precipitação tomam conseqüente à ação do vento (WMO, 2008b: I.6-4). .....	28
<b>Figura 17.</b> Representação de fosso utilizado para instalação de udógrafo no solo e respectivas dimensões de grelha (WMO, 1984: 109).....	29
<b>Figura 18.</b> Localização do posto de registo de precipitação do Pico do Areeiro .....	40
<b>Figura 19.</b> Localização do posto de registo de precipitação do Funchal (IPMA).....	40
<b>Figura 20.</b> Udógrafo do IPMA.....	41
<b>Figura 21.</b> Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo.....	46
<b>Figura 22.</b> Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA. ....	47
<b>Figura 23.</b> Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo.....	50
<b>Figura 24.</b> Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA. ....	51
<b>Figura 25.</b> Representação gráfica da relação intensidade da precipitação ( $I_p$ ), velocidade do vento ( $v_v$ ) e fator corretivo ( $k$ ) do Pico do Areeiro, utilizando o Wolfram Mathematica for students 7.1.....	55
<b>Figura 26.</b> Representação gráfica da relação intensidade da precipitação ( $I_p$ ) e fator corretivo da precipitação ( $k$ ) do Funchal, utilizando o <i>Wolfram Mathematica for students</i> 7.1.....	56
<b>Figura 27.</b> Regressão linear padronizada entre o valor previsto e residual do fator corretivo de precipitação ( $k$ ) do Pico do Areeiro.....	59
<b>Figura 28.</b> Regressão linear padronizada entre o valor previsto e residual do fator corretivo de precipitação ( $k$ ) do Funchal. ....	59
<b>Figura 29.</b> Especificações do udógrafo <i>Rain Collector II</i> (Davis, 2013) .....	68
<b>Figura 30.</b> Especificações do udógrafo do IPMA (Lambrecht, 2013) .....	69

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1.</b> Erros sistemáticos presentes no registo da precipitação e seus respetivos fatores (baseado em WMO, 2008a: 1.3-5).....	26
<b>Tabela 2.</b> Quadro-resumo das fórmulas utilizadas no estudo das perdas de precipitação pelos pluviómetros, considerando a ação do efeito do vento (baseado em Hsu <i>et al.</i> , 2005: 82-83) .....	36
<b>Tabela 3.</b> Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo. ....	45
<b>Tabela 4.</b> Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA. ....	47
<b>Tabela 5.</b> Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo. ....	49
<b>Tabela 6.</b> Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA. ....	51
<b>Tabela 7.</b> Análise ANOVA dos dados do Funchal, registados em intervalos de 10 minutos.....	57
<b>Tabela 8.</b> Análise ANOVA dos dados do Pico do Areeiro, registados em intervalos de 10 minutos.....	58
<b>Tabela 9.</b> Cálculo dos coeficientes da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Pico do Areeiro. ....	70
<b>Tabela 10.</b> Cálculo dos coeficientes de determinação da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Pico do Areeiro.....	70
<b>Tabela 11.</b> Cálculo dos coeficientes da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Funchal.....	71
<b>Tabela 12.</b> Cálculo dos coeficientes de determinação da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Funchal. ....	71

# Índice de Equações

Equação	
(1).....	33
(2).....	34
(3).....	35
(4).....	35
(5).....	36
(6).....	36
(7).....	36
(8).....	36
(9).....	37
(10).....	37
(11).....	37
(12).....	38
(13).....	44
(14).....	44
(15).....	54
(16).....	54
(17).....	54
(18).....	54

## Introdução

---

Com o início da evolução das civilizações primitivas, o Homem teve noção que o seu desenvolvimento estaria associado ao bem mais precioso e essencial à sua existência - a água (Quintela, 1996: 1.1).

Durante milénios, o Homem considerou que este recurso seria inesgotável até que se chegou à realidade: devido aos usos abusivos e à procura intensiva por parte do Homem, a existência de água doce na superfície terrestre é considerada escassa embora, no geral, a água seja considerada um recurso natural renovável<sup>1</sup> (Marques *et al.*, 2009: 1). Apesar de existir muita água no planeta, o maior volume (cerca de 94%) está nos oceanos e é salgada. A restante parcela (cerca de 6%) representa a totalidade de água doce estando concentrada nas regiões polares (estado sólido), na atmosfera (vapor de água), no subsolo, à superfície e nos seres vivos (estado líquido) (Lencastre *et al.*, 2006: 24).

No caso das ilhas, a disponibilidade de água doce torna-se um fator importante para a sua habitabilidade, pois devido ao seu reduzido tamanho, pequenas alterações climáticas são suficientes para variar substancialmente as reservas de água disponíveis (Figueira, 2009: 8). O acesso à água, tanto pela fauna e flora locais como pelas populações humanas, depende essencialmente da inclinação e permeabilidade do terreno, da presença ou ausência de cobertura vegetal e da sua natureza, o regime de intensidade da precipitação e da sujeição aos diferentes microclimas proporcionados pelo relevo e/ou atividade humana (Figueira, 2009: 8). Para entender e estudar as disponibilidades hídricas de um determinado local é necessário conhecer o ciclo hidrológico dessa área.

O ciclo hidrológico é definido como sendo uma sequência fechada de fenómenos associados à troca e movimentação de água, nos diferentes estados físicos, entre a hidrosfera, a atmosfera, as camadas superiores da litosfera e organismos vivos (Quintela, 1996: 2.1). O ciclo hidrológico pode ser observado na Figura 1.

---

<sup>1</sup>A água é considerada um recurso natural renovável por estar, constantemente a ser repostado pela natureza através do ciclo da água, ou ciclo hidrológico. Se este recurso for gerido de forma ajustada, pode ser utilizado indefinidamente, sem qualquer transtorno para o Homem (Samuelson *et al.*, 2010: 237)



Figura 1. Representação do ciclo hidrológico (USGS, 2013)

Esta sequência constante de fenômenos deve-se à capacidade que a energia solar tem para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e à gravidade, fazendo com que esta volte à superfície terrestre por precipitação. Ao atingir a superfície terrestre, a água será reencaminhada para cursos de água que se unirão a outros originando, por vezes, rios de grande dimensão até atingir o oceano (escoamento superficial), ou será infiltrada nos solos e nas rochas através dos poros ou fissuras (escoamento subterrâneo), podendo sofrer também evapotranspiração (Carvalho *et al.*, 2006: 11).

Na evapotranspiração está implícito a combinação de dois fenômenos: a evaporação e a transpiração. A evaporação diz respeito ao processo de passagem da água do estado líquido ao estado gasoso, enquanto a transpiração é a libertação da água absorvida pelas plantas e por elas eliminada nos diferentes processos biológicos, sob forma de vapor de água. Na transpiração não está incluída a água existente no solo (Lencastre *et al.*, 2006: 77).

Parte da água que percola o solo e que atinge a zona saturada, entra na circulação subterrânea e contribui para o aumento de água armazenada (recarga dos aquíferos), formando um aquífero de base. Geralmente, quando os aquíferos atingem a sua capacidade máxima, a água pode escoar em direção a rios, lagos, oceano e, até mesmo, surgir à superfície como nascentes (Carvalho *et al.*, 2006: 11).

O aproveitamento dos recursos hídricos requer atenção, da conceção, planeamento e projeto, das diferentes áreas do saber, desde as engenharias (e.g. ambiental, sanitária, civil), ecologia, geologia, hidrologia, agronomia, silvicultura, economia, etc., de modo a satisfazer as necessidades da população e tirar o máximo benefício do ciclo hidrológico natural (Lencastre *et al.*, 2006: 21).

Ao longo dos anos, com a crescente ocorrência de fenómenos climáticos cada vez mais extremos, como ondas de calor e o aumento da frequência de episódios de precipitação extrema, as áreas da Hidrologia, Recursos Hídricos e Meteorologia têm vindo a dar grande importância aos erros de medição dos udógrafos, pois devido a vários fatores (Sepúlveda, 2009: 13; Costa, 2009: 74-84), a precipitação dos udógrafos e a que atingem o solo podem ser diferentes. Por essa razão, e de forma a estimar o valor real de precipitação que cai no solo e conseqüentemente, obter uma estimativa do valor real do escoamento superficial, muitos estudos foram efetuados para reduzir os erros nas amostras de precipitação e assim contribuir para o dimensionamento mais preciso de estruturas hidráulicas e para a proteção de bens e vidas populacionais (Lencastre *et al.*, 2006; Sepúlveda, 2009).

## **1. Objetivos**

Na área da Engenharia Civil, a precipitação e o escoamento superficial que afluem à rede hidrográfica são os dois componentes do ciclo hidrológico que têm maior impacto nos aproveitamentos hidráulicos, por serem essenciais para a produção de energia, rega, abastecimento de populações, controlo de cheias, etc., sendo, desta forma, possível de controlar e caracterizar grande parte da precipitação que afluem na rede hidrográfica num determinado local (Lencastre *et al.*, 2006: 21). A caracterização e controlo da precipitação e do escoamento superficial é uma ferramenta importante para projetistas de obras hidráulicas, técnicos de planeamento e gestão de recursos hídricos e do território e agentes da Proteção Civil, contribuindo para a previsão antecipada de situações extremas (e.g. cheias-rápidas). Embora, globalmente, este tipo de situações tenham aumentado significativamente na última década, existem poucos estudos baseados em dados observados devidos, essencialmente, à sua escassez e discordâncias entre modelos adaptados e dados recolhidos (Sepúlveda, 2009: 6).

Neste estudo, em concreto, é pretendido determinar um modelo de equação de correção da precipitação, recorrendo a valores obtidos por um udógrafo instalado no solo e um udógrafo do Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) que se encontra

a uma altura *standard* de 1,5 m do solo e, ainda, a valores de velocidade do vento obtidos pelo anemómetro do IPMA, com a finalidade de poder ser determinado o valor real de precipitação que cai no solo em dois locais da ilha da Madeira. A elaboração de equações de correção de precipitação, para a determinação do valor real de precipitação, torna-se uma ferramenta fundamental para a Engenharia Civil pois, através destas é possível dimensionar, projetar, executar, fazer manutenção e controlo, mais cuidadoso, de estruturas hidráulicas evitando possíveis problemas como o transbordo de águas de escoamento superficial, inundações, o subdimensionamento de sistemas de escoamento de águas pluviais e outros problemas que daí advêm.

## **2. Organização da tese**

Este documento é organizado em cinco capítulos, com as seguintes abordagens:

No Capítulo I é feita uma caracterização da Ilha da Madeira, considerando a geomorfologia e descrição geológica geral, a climatologia, a vegetação e, por fim, a existência de recursos hídricos na ilha e suas utilidades.

No Capítulo II apresenta-se alguns equipamentos existentes para medição de precipitação e seu modo de funcionamento.

No Capítulo III apresenta-se um resumo de algumas das metodologias de recolha, análise e correção de precipitação que está sujeita ao campo de deformações do vento.

No Capítulo IV é elaborado a análise estatística dos valores de precipitação obtidos, tendo em consideração o efeito do vento nos aparelhos medidores, de modo a obter uma equação modelo de correção de precipitação para o Pico do Areeiro e no Funchal.

No Capítulo V elaboram-se as conclusões finais deste estudo e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo I: Caracterização geral da ilha da Madeira

---

A ilha da Madeira, situada no Oceano Atlântico entre os meridianos 16°39'W e 17°16'W e os paralelos 32°38'N e 32°52'N, apresenta um clima ameno, tanto no inverno como no verão. O clima é influenciado pela intensidade e localização do anticiclone subtropical dos Açores, bem como pela configuração e orientação do relevo e a altitude, resultando num efeito de diferenciação climática local (Figueira, 2009: 22).

Este capítulo será dividido em quatro subcapítulos: a geomorfologia e a descrição geológica geral, a climatologia, a caracterização da vegetação e os recursos hídricos na ilha da Madeira. Estes quatro subcapítulos, em traços gerais, têm o intuito de caracterizar, de uma forma geral, a ilha da Madeira facilitando a compreensão e análise de alguns aspetos e problemáticas abordadas ao longo deste trabalho.

### I.1. Geomorfologia e descrição geológica geral

A Madeira formou-se a partir de um ponto quente (“*hot-spot*”), tendo emergido há cerca de 7 Ma (Prada, Comunicação pessoal, 2013), numa zona da placa africana onde a crosta oceânica tem mais de 130 Ma (Brum da Silveira *et al.*; 2010: 8). Na atualidade, o vulcanismo atravessa uma fase de inatividade eruptiva ocorrendo, no entanto, manifestações de vulcanismo secundário, como libertação de dióxido de carbono e ocorrência de águas termais nos túneis da Encumeada e dos Tornos e na galeria da Fajã da Ama (Prada, 2000: 11).

A Madeira, principal ilha que dá nome ao Arquipélago, possui um relevo com orientação Este-Oeste, com uma superfície de 737 km<sup>2</sup> (58 km de comprimento por 23 km de largura) e uma altitude máxima de 1861 m (localização do Pico Ruivo). Quase toda a linha costeira é constituída por uma sucessão de arribas íngremes embora tal seja mais evidente a norte do que a sul devido à combinação significativa e intensa das dinâmicas marítimas e eólicas existentes a norte, que levam à intensa erosão e recuo das arribas (Prada *et al.*, 2005: 2).

## Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira Capítulo II: Equipamento de medição da precipitação

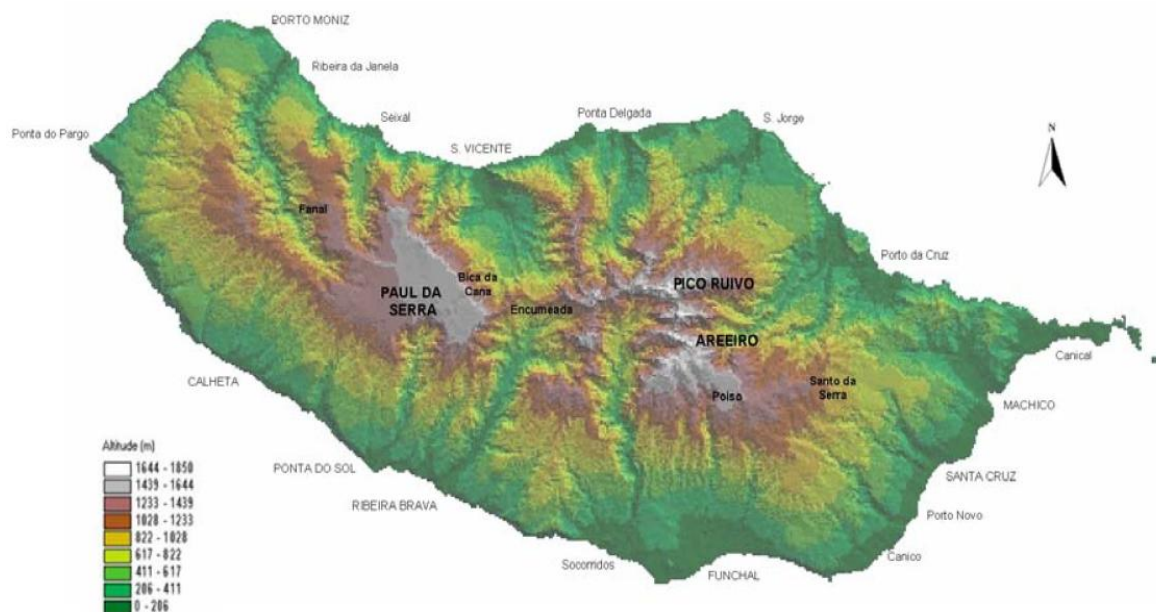


Figura 2. Relevo da ilha da Madeira (Santos *et al.*, 2006: 12)

Formada num ambiente geodinâmico intraplaca (num contexto oceânico), a ilha possui um corpo alongado e irregular resultante de três diferentes fases eruptivas de intensa atividade, separados por períodos de atividade muito atenuada ou de inatividade, onde a erosão contribuiu para a redução da dimensão da ilha. Segundo Brum da Silveira *et al.* (2010), a estratigrafia da ilha pode ser reconhecida por três complexos principais (da base para o topo):

1. Complexo Vulcânico Inferior (CVI) (Miocénico  $\geq 5,2$  Ma);
  - i. Unidade do Porto da Cruz (CVI 1);
  - ii. Unidade dos Lameiros (CVI 2);
2. Complexo Vulcânico Intermédio (CVM) (Plio - Plistocénico 5,57 – 1,8 Ma);
  - i. Unidade da Encumeada (CVM 1);
  - ii. Unidade da Penha D'Água (CVM 2);
  - iii. Unidade do Curral das Freiras (CVM 3);
3. Complexo Vulcânico Superior (CVS) (Plistocénico e Holocénico  $\sim 1,8 - 0,007$  Ma);
  - i. Unidade dos Lombos (CVS 1);
  - ii. Unidade do Funchal (CVS 2);

Para além destas, a ilha também é composta por depósitos sedimentares recentes, tais como: aluviões (a), cascalheiras e areias de praia (cap), depósitos de vertente e coluviões (dv), depósitos de movimentos de massa (dm), depósito de areias eólicas (ad).

Depósitos de movimentos de massa (dm) são acumulações (por gravidade) de detritos de variada granulometria provenientes da desagregação de escarpas, arribas e vertentes fluviais devido à alteração do solo superficial, de produtos piroclásticos e de mantos. Os depósitos de vertente (dv) são muito comuns em toda a ilha por se situarem, em geral nos taludes junto às ribeiras (Prada, 2000: 65).

Segundo Brum da Silveira (2010: 26), as aluviões (a) são depósitos sedimentares fluviais de variada granulometria com grau de rolamento variado e podem ser encontradas ao longo de toda a bacia hidrográfica e em zonas de extravasamento de ribeiras em áreas aplanadas.

Na ilha da Madeira, o termo “aluvião” é aplicado, popularmente, a cheias-rápidas. As cheias rápidas (ou *flash - floods*) são grandes massas de água que escoam com grande velocidade e têm capacidade de transportar materiais de variada granulometria, originando depósitos sedimentares. Neste tipo de acontecimento é usual haver transbordo de água e material sedimentar para as margens originando inundações, danos materiais e, possíveis perdas humanas (Sepúlveda, 2011: 20). Este tipo de fenómeno está associado a condições meteorológicas severas que ocasionam chuvas torrenciais durante curtos períodos de tempo, podendo ocorrer em qualquer bacia hidrográfica da ilha da Madeira. Historicamente, este tipo de ocorrência tem vindo a ser registado desde tempos tão remotos como 1 de Dezembro de 1601 até à atualidade (20 de Fevereiro de 2010), sendo de referir que, embora este ocorra tendo em base causas naturais (e.g. sistemas frontais associado a passagem de depressões, formas do relevo, estrutura geológica da ilha, etc.), também é potenciado pela ocupação antrópica do solo (e.g. destruição da vegetação, ocupação dos leitos de cheia) (Quintal, 2012).

Geomorfologicamente, a Madeira encontra-se dividida em três complexos principais do sentido Este – Oeste: a Ponta de São Lourenço, o Maciço Vulcânico Central e o Planalto do Paul da Serra.

A Ponta de São Lourenço, situada a Este, possui uma altitude média reduzida, tipo de vegetação e clima diferentes de todo o resto da ilha.

No Maciço Central (zona central da ilha) encontram-se os picos mais altos com altitudes superiores a 1800 m acima do nível médio das águas do mar (Pico do Areeiro e Pico Ruivo). Este complexo apresenta grandes vales de ribeiras e bacias de receção, penhascos íngremes e inclinações elevadas do terreno devido à ocorrência de forte erosão hídrica.

O Planalto do Paul da Serra é uma zona plana de área significativa, de elevada altitude (entre 1200 – 1600 m acima do nível médio das águas do mar), propícia à formação de lagoas temporárias pela queda de níveis elevados de precipitação sob forma de chuva que depois se vai infiltrando no solo e favorecendo a recarga das águas subterrâneas da ilha (Prada, 2000: 323).

## **I.2. Climatologia**

### **I.2.1. Caracterização do clima da ilha da Madeira**

As características climáticas existentes na ilha da Madeira são, predominantemente, determinadas pela localização e intensidade do anticiclone subtropical dos Açores, e ainda pela orientação e morfologia do relevo (Prada, 2000: 93). Segundo Ferreira (1955), a ilha pode ser atingida por diversos tipos de massas de ar que são afetadas pela orientação, desenvolvimento e posição do anticiclone dos Açores.

1. Com o anticiclone dos Açores centrado nas proximidades e para sul dos Açores e orientado na direção aproximada Sudoeste-Nordeste, a ilha é atingida por massas de ar tropical marítimo subsidente, onde os ventos são moderados ou favoráveis de Norte e o céu fica nublado com cúmulos<sup>2</sup> e estratocúmulos<sup>3</sup>, ocorrendo por vezes aguaceiros fracos.
2. Com o anticiclone na mesma posição, e orientado na direção Oeste - Este, a ilha é atingida por massas de ar tropical marítimo muito húmidas, com ventos moderados de Oeste e o céu manifesta-se nublado com cúmulos e estratocúmulos, ocorrendo chuveiros ou aguaceiros orográficos fracos nas zonas montanhosas.
3. Com o anticiclone centrado nas proximidades e para Norte dos Açores, orientado segundo a direção Norte - Sul, a ilha é afetada por massas de ar tropical marítimo quente, com vento bonançoso de Norte, com céu nublado com cúmulos e estratocúmulos, com possibilidade de ocorrência de aguaceiros orográficos fracos.

---

<sup>2</sup>Designam-se por cúmulos: nuvens isoladas, normalmente densas, com contornos nítidos e desenvolvem-se (verticalmente) em forma de torres ou cúpulas, parecendo uma couve-flor. As zonas expostas aos raios solares são um branco brilhante enquanto a base é cinzenta ou muito escura (Silva, 2006: 326).

<sup>3</sup>Designam-se por estratocúmulos nuvens cinzentas ou esbranquiçadas ou, ainda, cinzentas e esbranquiçadas quase sempre com proporções escuras e de aspeto não fibroso (Silva, 2006: 324-325).

4. Com a mesma posição e orientação e, se o anticiclone se estender para Norte e houver simultaneamente, ocorrência de baixas pressões no mediterrâneo ocidental ou Golfo da Gasconha, a ilha é afetada por massas de ar polar marítimo frio com ventos favoráveis de Norte ou Nordeste, com céu nublado com ocorrência mais frequente de aguaceiros nas terras altas.
5. Com o anticiclone muito desenvolvido sobre o Noroeste da Europa com orientação segundo Sudoeste - Nordeste, este transporta massa de ar polar continental modificado, provocando vento moderado de Nordeste e céu nublado com cúmulos e estratocúmulos sobre a ilha.
6. Com um anticiclone muito desenvolvido, centrado para Norte da ilha e orientado segundo Oeste - Este, esta é atingida por massa de ar tropical continental com vento quente muito seco de Este que acarreta poeiras finas (provenientes do deserto do Sahara) formando um nevoeiro seco e denso. O tempo de leste acontece entre os meses de fevereiro e abril e entre agosto e outubro, podendo durar entre três e sete dias.
7. Caso o anticiclone estiver orientado na direção Sudoeste - Nordeste, o vento é de Sul e há muita nebulosidade.

Em comparação com o Arquipélago dos Açores e o Continente, a Madeira é pouco suscetível à passagem de frentes (quentes e frias)<sup>4</sup> por causa da sua posição geográfica. Quando estas ocorrem são mais ativas e vulgares durante o outono e inverno do que durante a primavera e verão, desencadeando ocorrência de muita nebulosidade, aguaceiros fortes nas zonas altas e ainda, ventos fortes a sul da ilha (Brito, 2005: 52; Prada, 2000: 97).

#### **I.2.1.1. Temperatura média do ar**

A Figura 3 demonstra a variação da temperatura média anual entre 1961 e 1990 ao longo de toda a ilha. Esta varia entre os 16 - 19 °C ao longo de toda a linha costeira embora a sul a temperatura média tenha valores mais elevados que a norte para a mesma cota devido, essencialmente, à diferente exposição aos ventos predominantes e exposição solar. Por esta razão, é possível afirmar que as cotas mais baixas a sul, como o Funchal, são as zonas mais quentes da região. Nos picos mais

---

<sup>4</sup>Denomina-se frentes frias à passagem de uma massa de ar, por um determinado local da superfície terrestre, que substitui o ar quente que ali existia por ar frio; as frentes quentes dizem respeito à substituição do ar frio por ar quente. As frentes frias deslocam-se no sentido Pólo-Equador, enquanto as frentes quentes migram no sentido oposto (Silva, 2006: 373-374).

altos da ilha, a temperatura média anual varia entre os 8 - 10 °C (Atlas Climático dos Arquipélagos das Canárias, da Madeira e dos Açores, 2011: 34).

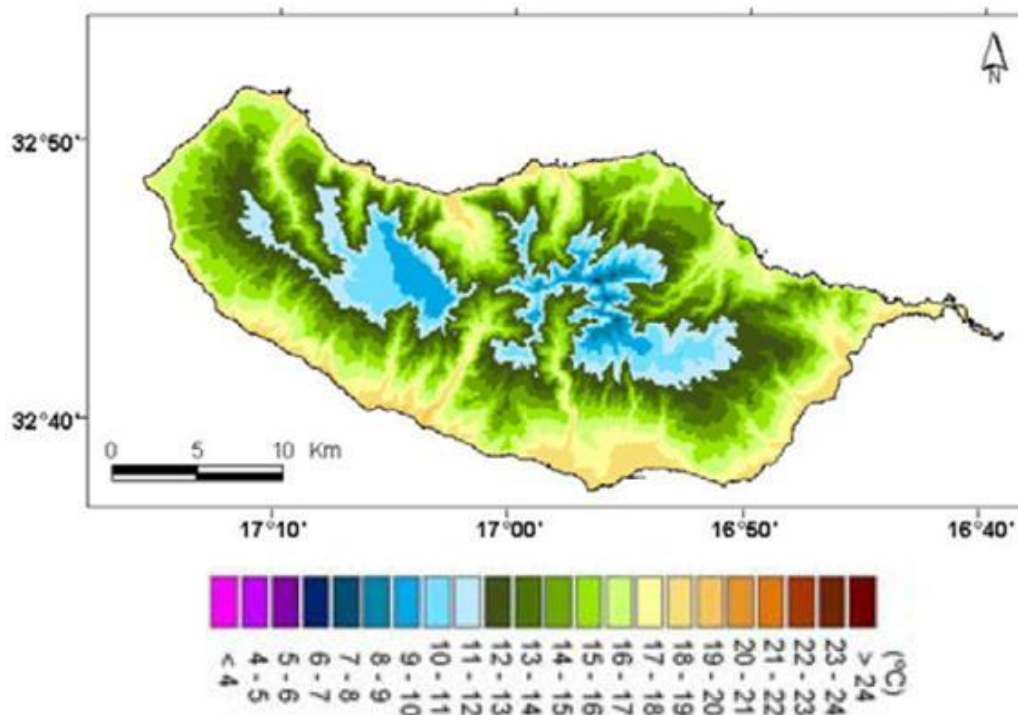


Figura 3. Temperatura média anual entre 1961 - 90 (Santos *et al.*, 2006: 13)

Independentemente das estações do ano, os valores anuais da temperatura do ar dependem da altitude do local (i.e., os valores da temperatura do ar diminuem com o aumento da altitude), da diferente exposição aos ventos predominantes e exposição solar (Prada, 2000: 98).

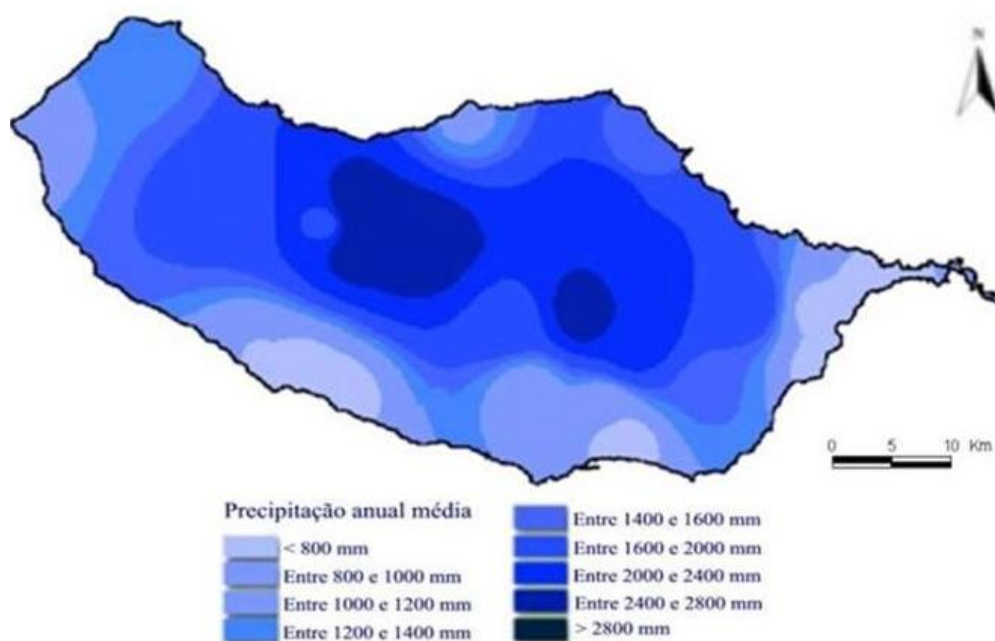
### I.2.1.2. Precipitação

A precipitação é considerada como sendo a deposição de água na superfície do Globo Terrestre sob a forma líquida ou sólida, não abrangendo a deposição de água provocada por nevoeiros ou por condensação do vapor, sob formas de orvalho e geada (Quintela, 1996: 5.1).

Segundo Prada *et al.* (2003: 9), a variação espacial e temporal da precipitação na ilha da Madeira é determinada pela correlação de vários fatores: a altitude, afastamento da linha costeira, a orientação dos vales, a orientação das encostas relativamente às direções preferenciais de avanço das massas de ar e o declive dos terrenos e conseqüente influência nos movimentos ascendentes das massas de ar húmido provenientes do Oceano Atlântico.

## Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira Capítulo II: Equipamento de medição da precipitação

Para a globalidade da ilha da Madeira, a quantidade de precipitação aumenta com o acréscimo da altitude, embora tal não seja linear, i.e., nas cotas mais baixas até aos 600 m, a quantidade de precipitação aumenta muito rapidamente, tornando-se cada vez mais lenta entre os 600 – 1600 m e com tendência a estabilizar após os 1600 m. Pela Figura 4 é possível observar que os valores de precipitação média anual são maiores no Planalto do Paul da Serra (Bica da Cana), lado oeste da ilha, e ainda nos Picos do Areeiro e Ruivo, lado este da ilha, enquanto nas zonas baixas da encosta sul da ilha, como é o caso do Lugar de Baixo, Funchal e Machico – Caniçal, os valores médios anuais de precipitação são mais baixos (Prada *et al.*,2005: 3).



**Figura 4.** Precipitação média anual na ilha da Madeira (Prada *et al.*, 2003: 10)

É evidente, nessa mesma figura, a existência de assimetrias na distribuição dos valores médios anuais de precipitação em locais com a mesma cota, registando maior volume de precipitação na encosta norte (Santos *et al.*, 2006: 15). Tal acontecimento deve-se ao vento provenientes de quadrante Norte que, com a presença de um relevo montanhoso, sofre compressão e arrefecimento com o aumento da altitude, formando nuvens. Quando estas atingem o seu limite, acaba por ocorrer precipitação orográfica. Quando os ventos contornam a cordilheira montanhosa, passando para o outro lado da encosta, o ar aumenta de temperatura, aumentando a sua capacidade de suporte de vapor de água e, conseqüentemente havendo menor capacidade de precipitar. Por essa razão é que ocorre maior queda de precipitação a norte do que a sul.

Na Figura 5 está representada a distribuição da precipitação ao longo dos meses do ano. Na média dos anos, a precipitação média mensal é mais intensa nos meses de outubro a março e menos intensa (i.e. período menos chuvoso) de abril a setembro.

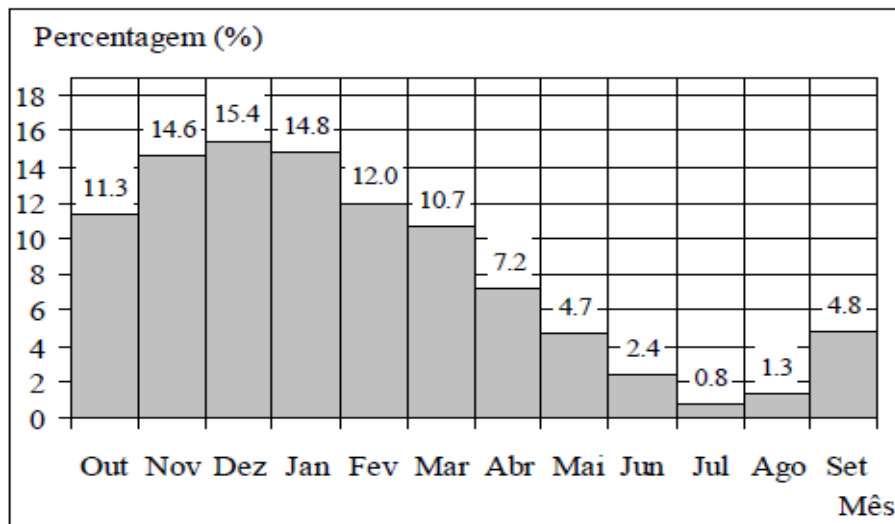


Figura 5. Precipitações médias mensais na ilha da Madeira expressas em percentagem de precipitação média anual (Prada *et al.*, 2003: 10)

Prada (2000: 117), também conseguiu demonstrar que à medida que ocorre o afastamento costeiro, existe tendência para haver variação espacial da precipitação em que se verifica a existência de uma zona central, constituída pelo Pico do Areeiro, Paul da Serra, Ribeiro Frio, Poiso, Montado do Pereiro, Curral das Freiras e Santo António, onde ocorre uma clara diminuição da precipitação com o embrenhamento insular.

### I.2.1.3. Vento

A Madeira é frequentemente afetada por ventos de Nordeste (NE) e Sudoeste (SW) ocorrendo de abril a setembro, pelo menos, 56 – 58% das vezes com uma velocidade média de 7 km/h (Santos *et al.*, 2006: 17). O vento predominante de Norte (que sopra essencialmente no inverno) torna-se muito tempestuoso, originando queda de neve nos picos mais altos, tendo uma frequência de 10 - 12%. O vento de Oeste, ocorrendo 20 - 22% das vezes sobre o Funchal, está associado à queda abundante de precipitação. Quando o Funchal é afetado por ventos de Sul ou Este existe uma tendência para a subida significativa da temperatura para valores superiores aos 30 °C em terras altas, embora sejam por um curto período de tempo (Prada, 2000: 99).

Embora o Funchal seja frequentemente afetado por ventos de NE e SW, denota-se que, através da Figura 6, existe uma dispersão razoável do vento pelos 8 octantes resultante do movimento de recirculação horizontal de ar<sup>5</sup> (Santos *et al.*, 2006: 17) que é provocado pela presença acidentada do relevo (existência de vales e montanhas), pelas diferenças de temperatura (Tomé, 2007) e pelas características locais (e.g. presença de edificações e árvores) (Jervell, 2008).

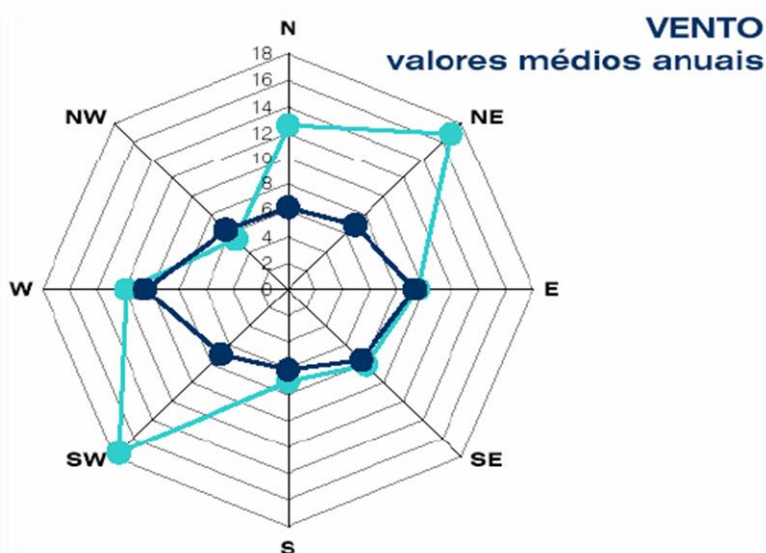


Figura 6. Medição de valores médios anuais da velocidade (km/h) (linha azul escura) e direção (frequência - %) (linha azul clara) do vento medidos no Funchal entre o período 1961 - 1990 (Santos *et al.*, 2006: 17)

#### I.2.1.4. Humidade relativa do ar

Os valores médios de humidade relativa do ar<sup>6</sup> situam-se entre 75 – 90%, sendo classificada como sendo muito húmido em toda a ilha exceto na zona do Funchal, Lugar de Baixo (Ponta do Sol) e Aeroporto (Santa Cruz), onde a humidade relativa do ar é considerada seca (inferior a 75%) (Plano Regional da Água da Madeira, 2003: 46; Prada, 2000: 99). Não é por acaso que, estas zonas possuem

<sup>5</sup>Exemplos de movimentos de recirculação horizontal de ar são: brisa marítima, brisa terrestre. Segundo Tomé (2007, 15), ao longo do dia, o ar aquecido e menos denso sobe sobre a superfície das regiões sobre o oceano e o ar mais frio sobre o oceano circula (horizontalmente) de forma a substituí-lo. Em altitude desenvolve-se uma circulação de retorno, o ar arrefece e desce sobre o oceano, fechando a circulação principal. Este tipo de circulação denomina-se brisa marítima. À noite, o arrefecimento da superfície terrestre é mais acentuado, na qual as temperaturas descem abaixo da temperatura da superfície do oceano, formando uma circulação inversa da que ocorre durante o dia. À superfície, o sentido do escoamento decorre da superfície das regiões para o oceano, sendo conhecido por brisa terrestre. (Tomé, 2007).

<sup>6</sup>Humidade relativa do ar é vista como sendo o quociente entre a massa de vapor de água contido num determinado volume de ar húmido e a massa de vapor de água que existiria nesse mesmo volume se o ar estivesse saturado, à mesma temperatura e pressão (Lencastre et al., 2006: 43).

maior registo médio anual da temperatura e o valor médio de precipitação seja considerado baixo.

#### **I.2.1.5. Nebulosidade**

Designa-se por nebulosidade toda a fração da abóboda celeste que, em determinado momento, fica encoberta de nuvens ou nevoeiro<sup>7</sup>. As nuvens são manifestações visíveis de gotículas de água e cristais de gelo, ou mistura de ambos, suspensas na atmosfera e originadas por condensação da água enquanto, os nevoeiros são nuvens que se formam junto à superfície do globo (Silva, 2006: 317-346).

Na ilha da Madeira, os valores médios de nebulosidade são maiores nas terras altas do que sobre o mar na mesma região devido à formação montanhosa existente.

Conforme é representado na Figura 7, o ar húmido proveniente do Atlântico ao encontrar-se a barlavento<sup>8</sup> com a barreira montanhosa, perpendicularmente aos ventos predominantes de Nordeste, tende a subir a encosta íngreme forçando-o a arrefecer adiabaticamente, condensando em pequenas partículas que ficam suspensas na atmosfera, formando nuvens ou nevoeiros (Ferreira, 1955) com tendência a se dissiparem a sotavento<sup>9</sup>. Estes nevoeiros orográficos dão origem a um fenómeno denominado mar de nuvens.

---

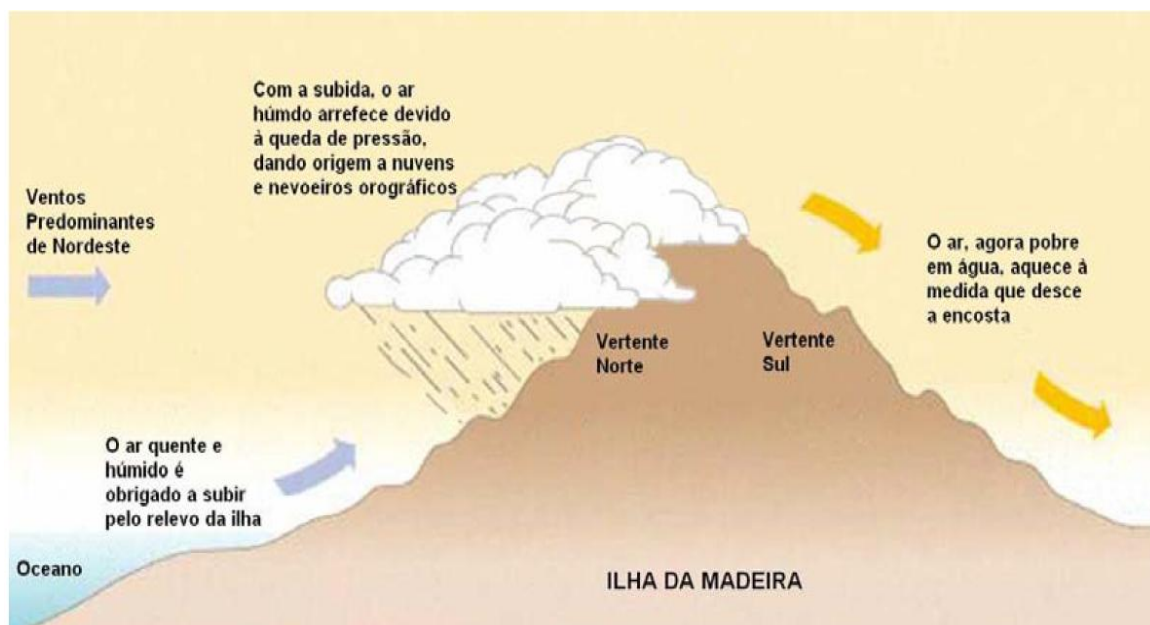
<sup>7</sup>Segundo Silva (2006: 349-351), os nevoeiros formam-se, essencialmente, de três maneiras: radiação, advecção e orográfico. Os nevoeiros de radiação (os mais comuns) formam-se devido ao arrefecimento noturno do solo por emissão de energia radiante. Este tipo de nevoeiro não se forma sobre o oceano visto que a superfície da água não arrefece rapidamente.

Os nevoeiros de advecção surgem quando o ar húmido escoia sobre uma superfície fria (solo ou água). O ar, quando percorre uma superfície, arrefece junto à superfície, proporcionando uma camada atmosférica estável, justaposta à superfície.

Os nevoeiros orográficos surgem quando o ar húmido e estável se eleva ao longo de uma encosta, expandindo-se adiabaticamente. Se o declive for suficientemente extenso, o ar ascendente torna-se saturado a certa altura e a partir daí até ao topo da elevação, forma-se nevoeiro.

<sup>8</sup>Considerado como a direção de onde sopra o vento.

<sup>9</sup>Considerado como sendo o lado oposto à direção predominante do vento.



**Figura 7.** Mecanismo de formação de nuvens e nevoeiros orográficos na Madeira – Efeito Föhn (Figueira, 2009: 23)

A variação de altitude é um fator importante para a condensação das massas de ar. Tanto no verão como no inverno, a camada nebulosa referente à condensação das massas de ar pode localizar-se entre 400 e 1600 m (Prada *et al.*, 2005: 6-7). Embora este fenómeno possa acontecer na zona sul da ilha, a sua ocorrência e densidade da nebulosidade são muito menores devido à menor quantidade de água condensada. Os fatores que resultam na formação, frequência e duração dos nevoeiros derivam do conteúdo em água líquida, do tamanho das gotículas, da velocidade do vento e da temperatura do ar (Figueira, 2009: 24).

### I.3. Vegetação

O arquipélago da Madeira juntamente com o dos Açores, de Cabo Verde e das Canárias formam um conjunto de ilhas oceânicas denominadas Macaronésia. Nestas, ocorre uma vegetação particular, relacionada com o posicionamento geográfico em relação aos continentes africano, europeu e americano. Os arquipélagos encontram-se posicionados, de uma maneira sequencial (quase) paralela e próxima do continente africano embora não se tenham formado em contato com a massa continental. O facto de as ilhas estarem isoladas dos continentes levou com que a vegetação que nelas se desenvolveu evoluísse em condições ambientais distintas dos continentes, tornando-se únicas de um ponto de vista científico e patrimonial sendo, desta forma,

classificadas como Património Mundial Natural da UNESCO<sup>10</sup> em 1999 (Capelo *et al.*, 2004: 5-9; Plano Regional da Água da Madeira, 2003: 47).

Com a chegada dos primeiros colonos, no início do século XV, a superfície e a vegetação da ilha sofreram diversas alterações de maneira a satisfazer a necessidade do Homem, levando a profundas alterações no coberto vegetal (Capelo *et al.*, 2004).

Atualmente, a vegetação da ilha é representada em “faixas” altitudinais, sendo relativamente densas até aos 1450 m de altitude e a partir daí, a existência de espécies torna-se mais escassa pois muitas delas não se desenvolvem (simultaneamente) em afloramentos rochosos, em temperaturas muito baixas nem onde o clima é extremamente húmido (Capelo *et al.*, 2004). Nestas zonas, onde o coberto vegetal torna-se escasso ou até mesmo diminuto, existe grande predisposição ao ataque dos agentes erosivos, facilitando o transporte de material por escoamento das águas superficiais, associado à elevada pluviosidade e ao acentuado declive das linhas de água. Nos leitos das principais linhas de água é possível visualizar muitos depósitos de sedimentos de variada granulometria provenientes de montante. Quando estes se depositam a jusante, onde se localizam os principais aglomerados populacionais, provocam estrangulamento nas linhas de água, contribuindo para inundações locais (Plano Regional das Águas da Madeira, 2003: 86-87).

#### **I.4. Recursos hídricos**

A rede hidrográfica da ilha é composta por mais de 200 cursos de água, alguns com leito com elevada pendente, margens instáveis com perfis em “V”, sujeitos muitas vezes a regimes de escoamento de carácter temporário mas torrencial. Esta característica deve-se, essencialmente, às pequenas dimensões das bacias hidrográficas (Fernandes, 2007).

Grande parte dos cursos de água, salvaguardando as ribeiras principais que apresentam escoamento superficial ao longo de todo o ano, têm tendência a secar nas épocas em que a precipitação é escassa. As ribeiras que possuem escoamento, durante o período de precipitação pouco abundante ou escassa, são alimentadas por água subterrânea drenada por nascentes.

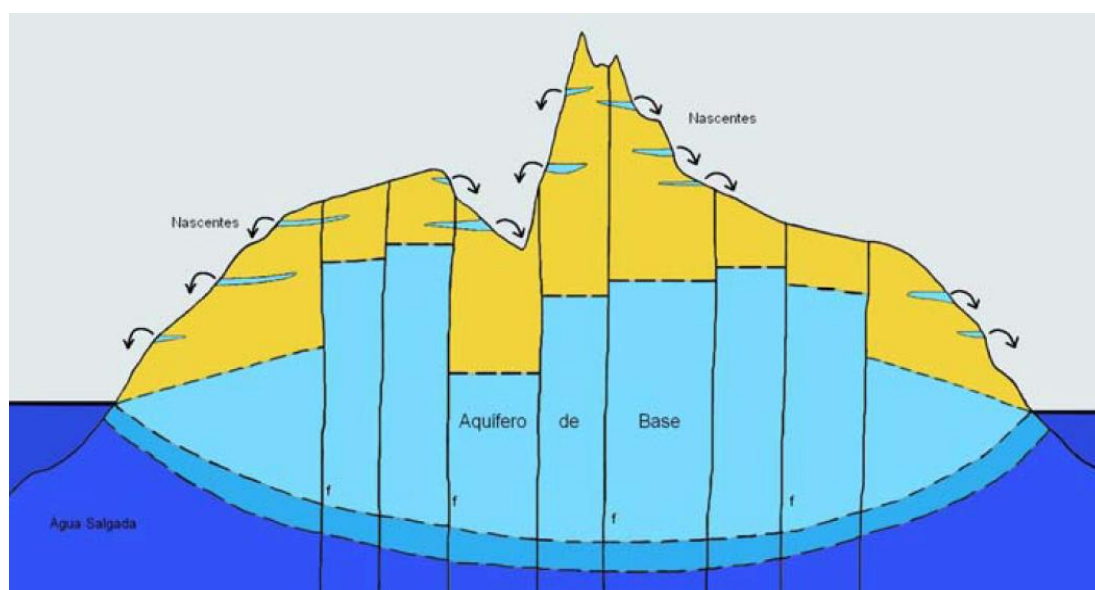
---

<sup>10</sup> *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, i.e., Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.



**Figura 8.** Bacias hidrográficas e cursos de água existentes na ilha da Madeira (Figueira, 2009: 19)

Devido à sua natureza vulcânica e heterogénea, a ilha possui um comportamento distinto no que se refere à circulação da água subterrânea pelas diferentes unidades hidrogeológicas.



**Figura 9.** Modelo hidrogeológico da ilha da Madeira (Prada *et al.*, 2005: 11)

O modelo hidrogeológico da Madeira é dividido em duas unidades hidrogeológicas: aquífero de base e aquíferos suspensos.

Segundo Prada *et al.* (2005: 10), os aquíferos suspensos possuem pequenas dimensões, situam-se em altitudes mais elevadas e formam-se quando a água encontra estratos geológicos impermeáveis ou pouco permeáveis, impedindo, deste modo, a percolação até ao aquífero de base. Quando o aquífero suspenso atinge o seu limite de capacidade, a água acaba por transbordar podendo percolar até outro

aquífero suspenso, até atingir o de base ou então, até ao exterior, formando nascentes de altitude.

O aquífero de base é composto por vários compartimentos nas camadas interiores e mais antigas da ilha, podendo ter níveis piezométricos divergentes entre si. A ocorrência de vários compartimentos nas camadas interiores deve-se à presença de estruturas rochosas verticais resultantes do arrefecimento de magma no interior de condutas vulcânicas de carácter fissural denominadas filões (Prada *et al.*, 2005: 10-11; Figueira, 2009: 20).

#### **I.4.1. Usos da água subterrânea**

Desde a chegada dos primeiros colonos à ilha, durante o século XV, houve necessidade de aproveitar os recursos subterrâneos que surgiam à superfície para a sustentação da população. Daí foi necessário a construção, ao longo dos tempos, de uma extensa rede de pequenos canais com o objetivo de transportar água de zonas com caudais abundantes para outras zonas com escassez de recursos hídricos, nomeadamente do norte para o sul (Figueira, 2009: 21; Plano Regional das Águas da Madeira, 2003: 75).

A partir da década de 50 do século XX, devido a crescente urbanização, a intensificação das práticas agrícolas no sul da ilha e a utilização de recursos hídricos para a produção de energia hidroelétrica, houve necessidade de construir infraestruturas complementares às já existentes, como é o caso do Sistema de Aproveitamento dos Tornos e do Sistema de Aproveitamento com Fins Múltiplos dos Socorridos. Estes sistemas de aproveitamento são compostos por cursos de água a céu aberto, por túneis e condutas que, aproveitando a gravidade, também servem para a produção de energia elétrica (e.g. Central da Serra d'Água) (Figueira, 2009: 21).

Na década de 80, devido à intensa urbanização das localidades do sul e consequente aumento da procura de recursos, foi necessário a conceção e construção de uma extensa rede hidráulica de abastecimento público, de interesse intermunicipal, ligando às principais origens de água potável na ilha. Desta forma, foi permitido a captação (utilizando galerias, furos e túneis), transferência, tratamento, armazenamento e adução de águas, garantindo um abastecimento público / urbano de alta qualidade às populações dos vários municípios da ilha e mantendo as atividades económicas e turísticas da região (Plano Regional das Águas da Madeira, 2003: 75-76).

## Capítulo II: Equipamento de medição da precipitação

---

Como fora descrito no Capítulo I, a precipitação é designada como sendo a deposição de água na superfície do globo terrestre sob a forma líquida ou sólida, não abrangendo a deposição de água provocada por nevoeiros ou condensação do vapor. A sua medição<sup>11</sup>, num determinado local, é extremamente difícil de ser efetuada embora, teoricamente esta seja vista como sendo o volume de água recolhido por unidade de área horizontal, num certo período de tempo específico, tendo em consideração que não existem perdas e as precipitações sólidas encontram-se fundidas (Comissão Nacional do Ambiente, 1984: 10; Quintela, 1996: 5.1).

Na prática, para efetuar a medição de precipitação, é necessário recorrer a equipamentos/instrumentos adequados para o efeito, devendo estes estar instalados/confinados numa determinada área cercada com a intenção de evitar vandalismos, proteção contra determinados eventos naturais de caráter destrutivo (e.g. inundações) e animais.

Neste capítulo serão demonstrados uma série de possíveis equipamentos utilizados para a medição de precipitação e seu funcionamento geral.

### II.1. Equipamentos para medição de precipitação

Para a medição da precipitação poderá ser possível a utilização de um dos seguintes equipamentos: radares meteorológicos, udómetros (ou pluviómetros) ou udógrafos (ou pluviógrafos).

#### II.1.1. Radares meteorológicos

A medição de precipitação por radar é baseada na emissão de pulsos de radiação eletromagnética e na medição da intensidade do sinal refletidos pelas partículas de chuva existentes na atmosfera. A relação entre a intensidade do sinal enviado e recebido (denominado refletividade) está relacionado com a intensidade de precipitação que cai sobre uma determinada região. Com este aparelho é possível

---

<sup>11</sup>A precipitação também pode ser vista como sendo a espessura, medida na vertical, duma lâmina de água que se acumularia sobre a projeção horizontal da superfície atingida, se toda a precipitação aí ficasse retida. Esta é expressa em mm.

1mm = 1 litro / m<sup>2</sup> = 10000litros / ha = 1000m<sup>3</sup> / km<sup>2</sup> (Lencastre *et al.*, 2006:45).

estabelecer a distribuição espacial da chuva em cada instante e dentro de um raio de 200 km (UTFPR, 2010: 45).

### **II.1.2. Udómetros e udógrafos**

Os udómetros (ou pluviómetros) são equipamentos de medição de precipitação diária que registam valores acumulados das 24 horas anteriores, a partir de um recipiente cilíndrico graduado, enquanto os udógrafos são equipamentos de registo contínuo da intensidade de precipitação que cai sobre o terreno, num determinado período de tempo (e.g. dias, semanas ou, até mesmo, meses), recorrendo a mecanismos de registo gráfico. A intensidade da precipitação é medida por mm/h.

Estes equipamentos possuem uma superfície recetora colocada horizontalmente ao solo e seus modelos e modo de instalação variam consoante o país: em regra, as áreas das superfícies recetoras variam entre os 100 e 1000 cm<sup>2</sup> e a altura de instalação é entre 0,3 e os 2,5 m acima do solo (Quintela, 1996: 5.2-5.3).

#### **II.1.2.1. Udómetro (ou pluviómetro)**

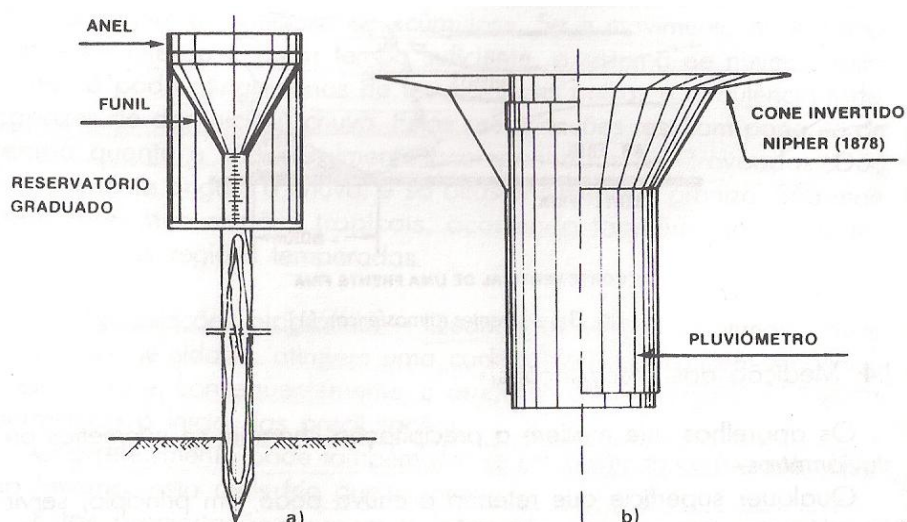
Grande parte dos casos, os udóm são observados em intervalos de 24 horas, a uma hora fixa, usualmente entre as 7 horas de um dia até às 9 horas da manhã do dia seguinte<sup>12</sup>. No caso da instalação de udómetros em locais onde a instalação diária não é muito prática, é possível usarem-se udómetros semanais, mensais ou para gupos de meses (Quintela, 1996: 5.3).

Os udómetros são constituídos por:

- ✓ um anel circular de bordos afilados que limita a superfície de receção;
- ✓ um funil onde a proteção horizontal constitui a superfície de receção, com um orifício pequeno na parte inferior para evitar as perdas por evaporação;
- ✓ um recipiente cilíndrico graduado onde se acumula a água da chuva.

---

<sup>12</sup>Se, por exemplo, a seção do recipiente for 1/10 da superfície, equivale dizer que 1 cm de água das chuvas graduada no recipiente representa 1 mm de chuva que caiu na superfície do terreno (Lencastre *et al.*, 2006:48).



**Figura 10.** Esquema de udómetro com: a) funil; b) cone invertido de Nipher (Lencastre et al., 2006: 48)

Os udómetros deverão obedecer a algumas regras de modo a evitar a adulteração da medição da precipitação, particularmente no que se refere a proteção (cone invertido de Nipher) para evitar, ao máximo, que os efeitos da turbulência mecânica (vento) interfiram na quantidade de precipitação recolhida. Com a presença do vento em contato com o udómetro, há formação de turbilhões em redor, tanto mais intensos quanto maior for a velocidade do vento, havendo maior ocorrência de erros na medição de precipitação (Comissão Nacional do Ambiente, 1984: 10; Lencastre *et al.*, 2006: 48).

### II.1.2.2. Udógrafos (ou pluviógrafos)

Os udógrafos (ou pluviógrafos) podem ser de dois tipos: de sifão ou com recipientes basculantes.

#### II.1.2.2.1. Sifão

No udógrafo tipo sifão (Figura 11), a água recolhida escoia para um reservatório cilíndrico (R) onde se situa um flutuador (F), permitindo transmitir o movimento da água através de uma haste (H) a um estilete (E). Quando a água atinge um nível máximo do reservatório (cerca de 10 mm de chuva), o sifão ativa-se e esvazia o reservatório em cerca de 12 segundos.

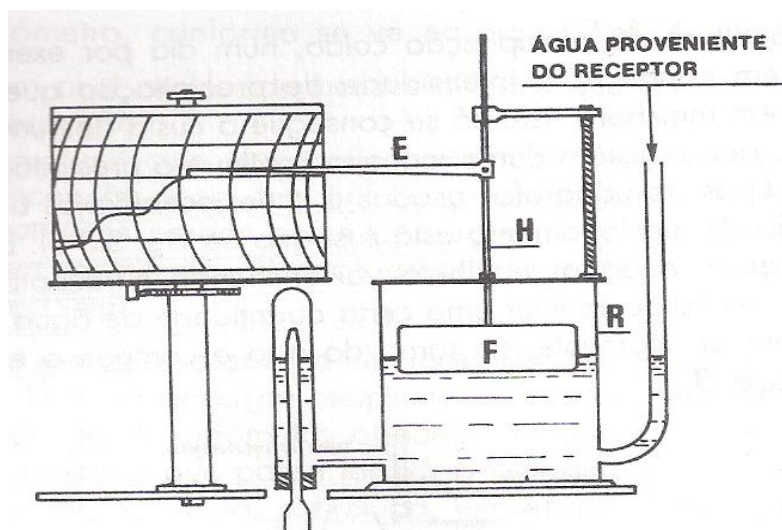


Figura 11. Udógrafo de sifão (Lencastre *et al.*, 2006: 50)

#### II.1.2.2.2. Recetáculos basculantes

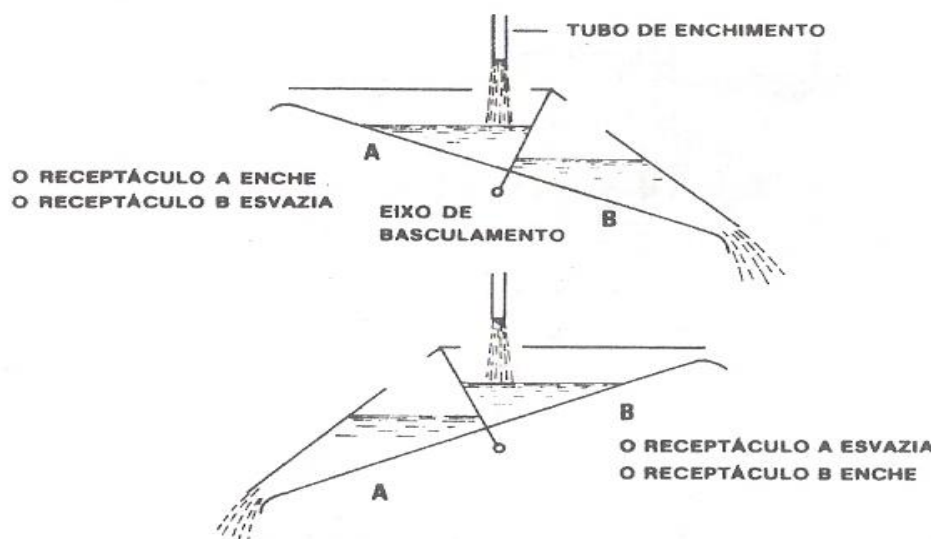
Segundo a Figura 12, o funcionamento de um udógrafo com recetáculos basculantes processa-se da seguinte forma (Lencastre *et al.*, 2006: 49):

1. A água recolhida pelo funil do udómetro escorre até ao recetáculo A até o encher;
2. Quando este estiver cheio, bascula em torno do eixo para dar início ao enchimento do recetáculo B. Ao bascular, o recetáculo entra em contato com um pequeno sensor que regista (continuamente) o seu movimento num *data logger*. Caso o recetáculo não atinja a sua capacidade máxima<sup>13</sup>, não ocorre basculamento.

Embora este tipo de mecanismo seja muito utilizado, a sua maior desvantagem é, para precipitações muito intensas, o basculamento dos recetáculos pode ser afetado por não ocorrer o esvaziamento total da água dos recetáculos e, conseqüentemente dar-se acumulação de água nos registos de precipitação total.

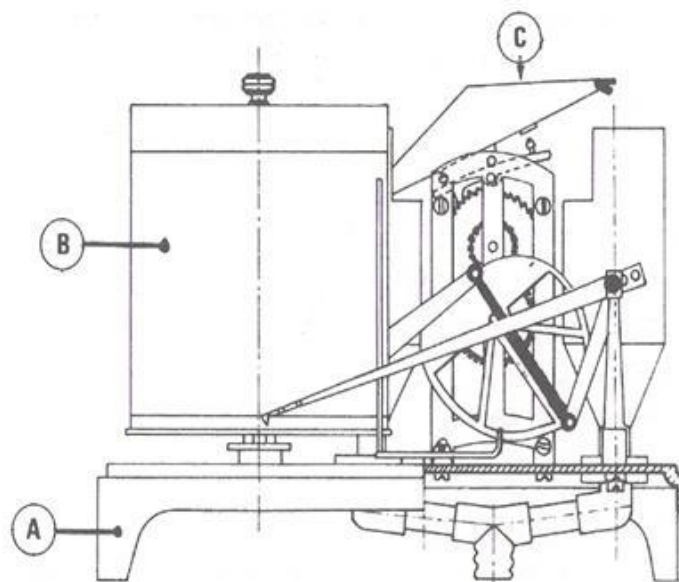
---

<sup>13</sup>É de frisar que, nem todos os basculantes possuem a mesma capacidade máxima, embora o seu funcionamento seja igual em qualquer modelo de udógrafo. Por exemplo, os udógrafos que possuem recetáculos basculantes com capacidade de enchimento de 10 g de água, representam 0,1 mm de precipitação que cai numa determinada área (Lencastre *et al.*, 2006).



**Figura 12.** Princípio de funcionamento do udógrafo com recipientes basculantes (Lencastre *et al.*, 2006: 49)

O registo do mecanismo dos udógrafos poderá ser em papel (sistema mais antigo) (Figura 13) ou, com a evolução da tecnologia, através do armazenamento dos dados num *data logger* e transmissão direta para um “computador central” do centro de investigação.



**Figura 13.** Mecanismo registador de um udógrafo com recipientes basculantes: (A) suporte; (B) cilindro registador e (C) mecanismo de recipientes (Lencastre *et al.*, 2006: 49)

Os udógrafos mais antigos transmitem, através de um dispositivo mecânico, o movimento do basculamento a um estilete, que regista num papel colocado num

cilindro rotativo de eixo vertical, podendo efetuar uma rotação completa num dia ou numa semana, dependendo da quantidade de precipitação recolhida. A água recolhida pelo mecanismo de basculamento é armazenada num recipiente graduado, servindo de controlo dos dados globais fornecidos pelo registador (Lencastre *et al.*, 2006: 50). Uma das desvantagens na utilização de papel no registo é que, ao final do dia ou mesmo de uma semana, seria necessário que alguém se dirigisse ao local e substituísse o papel registado por um novo, pois é possível que ocorra falta de papel para o registo de novos dados.

No entanto, na elaboração deste estudo foi utilizado, para a medição da precipitação, udógrafos de recetáculos basculantes com mecanismo magnético (modelo *Rain Collector II – Davis*), e *data loggers* (modelo *Pendant® Event Data Logger*) com capacidade de registar continuamente precipitação (Figuras 14 e 15). As especificações dos equipamentos do solo e do IPMA encontram-se no Anexo A.



**Figura 14.** Udógrafo de funil protegido por uma rede para evitar erros no registo da quantidade de precipitação.



**Figura 15.** Pormenor do sistema de recetáculos basculantes, do mecanismo magnético de registo da precipitação e do *data logger*.

Adoptou-se este tipo de equipamento por ser o equipamento disponível para a investigação académica e porque este possui capacidade de registar durante um longo período de tempo, sendo apenas necessário dirigir-se, mensalmente, aos locais de instalação dos equipamentos para recolher os dados através de uma ligação USB<sup>14</sup> ao computador e, ao mesmo tempo efetuar (caso necessário) a sua manutenção (e.g. mudança de baterias, limpeza de resíduos das chuvas e sujidades), de modo a mantê-lo em correto funcionamento.

---

<sup>14</sup> *Universal Serial Bus*, i.e., tipo de ligação utilizada para conectar periféricos (e.g. impressoras, scanners, etc.) a um computador.

## Capítulo III: Modelos de correção da precipitação

---

### III.1. Introdução

A medição pontual da precipitação, efetuada pelo udógrafo, tem como principal objetivo a obtenção de amostras representativas<sup>15</sup> da queda de pluviosidade numa dada área limitada (WMO, 2008a: I.3-1) mas, devido a erros locais (Goodison *et al.*, 1998: 1; WMO, 1984: 19), haverá sempre a possibilidade de essas mesmas amostras serem comprometidas, tornando-se pouco significativas para análise. Por estas razões, investigadores de todo o mundo sentiram necessidade de executar ensaios e observações de dados (laboratoriais e *in situ*), de maneira a encontrar equações de correção de precipitação e eliminar possíveis erros que poderiam surgir na recolha/registo dos dados de precipitação.

Neste capítulo serão apresentados alguns dos estudos e métodos utilizados para a correção da precipitação em todo o mundo, desde metade do século XX. Para além dos estudos mencionados neste capítulo, existem muitos outros métodos de correção de precipitação que não foram referidos mas, que contribuem da mesma forma para a evolução nas áreas da Hidrologia e Recursos Hídricos, de forma a alcançar melhores resultados e contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas de calibração de equipamentos (Sevruk *et al.*, 2009: 380).

### III.2. Registo de precipitação e erros associados

Como fora anteriormente relatado, a medição de precipitação efetuada num determinado local pode estar sujeita, continuamente, a uma variedade de erros que podem alterar a representatividade das amostras. Segundo o WMO (2008a: I.3-1), os erros sistemáticos a considerar na determinação (estimada) da quantidade de precipitação pontual são:

- a) Erros sistemáticos associados ao campo de deformação do vento acima da abertura do udógrafo;
- b) Erros associados a perdas por formação de humidade nas paredes internas do udógrafo e dos recipientes basculantes (“*wetting*”);

---

<sup>15</sup> Mesmo que a amostra de precipitação seja a melhor num determinado local, esta apenas representa a quantidade de precipitação que cai numa dada área, embora a dimensão desta dependa do comprimento do período de acumulação de precipitação, da homogeneidade fisiográfica da região, da topografia local e do processo de produção de precipitação (WMO, 2008b: I.6-2).

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

- c) Erros associados a perdas por evaporação das paredes do udógrafo e dos recetáculos basculantes;
- d) Erros associados à queda de neve;
- e) Erros associados aos salpicos de água para dentro e fora do udógrafo (“*splashing in / out*”);
- f) Erros aleatórios observacionais e instrumentais.

Na Tabela 1 encontra-se exposto, resumidamente, os erros sistemáticos, a percentagem a ser considerada na correção de precipitação e fatores (meteorológicos e instrumentais) que estarão na causa dos erros.

**Tabela 1.** Erros sistemáticos presentes no registo da precipitação e seus respetivos fatores (baseado em WMO, 2008a: I.3-5)

<b>Erro sistemático</b>	<b>Percentagem [%]</b>	<b>Fatores meteorológicos</b>	<b>Fatores instrumentais</b>
<b>Campo de deformação do vento</b>	2 – 10 10 – 50*	Velocidade do vento na boca do udógrafo durante a queda de precipitação	A forma e a capacidade do udógrafo
<b>Perdas por formação de humidade nas paredes internas do udógrafo e dos recetáculos basculantes</b>	2 - 10	Intensidade, frequência e quantidade de precipitação, o tempo de secagem	A forma e a capacidade do udógrafo, o material, a cor e a idade do udógrafo
<b>Perdas por evaporação das paredes do udógrafo e dos recetáculos basculantes</b>	0 - 4	Tipo de precipitação, o limite de saturação, a velocidade do vento ao nível do udógrafo entre o intervalo de término de precipitação e a sua medição	A área do orifício do udógrafo, a cor, e em alguns casos, a idade do udógrafo ou o tipo de funil (rígido ou removível)
<b>Salpicos de água para dentro e fora do udógrafo</b>	1 - 2	Intensidade de precipitação e velocidade do vento	O tipo de instalação do udógrafo, a forma e a profundidade
<b>Queda de neve</b>	-	Intensidade e duração da tempestade de neve, a velocidade do vento e o estado da neve de cobertura	A forma e a capacidade do udógrafo

\*Para correções tendo em conta a precipitação sólida (neve)

De todos os erros sistemáticos anteriormente mencionados, o efeito do vento (a sua direção e intensidade) é referido como sendo a causa mais significativa dos erros ocorridos na medição de precipitação (Pollock, 2010: 15; Hsu *et al.*, 2005: 81-82; Nešpor *et al.*, 1999: 1; Chvíla *et al.*, 2005: 1).

O efeito do vento pode ser de dois tipos: o efeito sobre o udógrafo, que geralmente reduz a quantidade de precipitação registada, e o efeito local sobre a

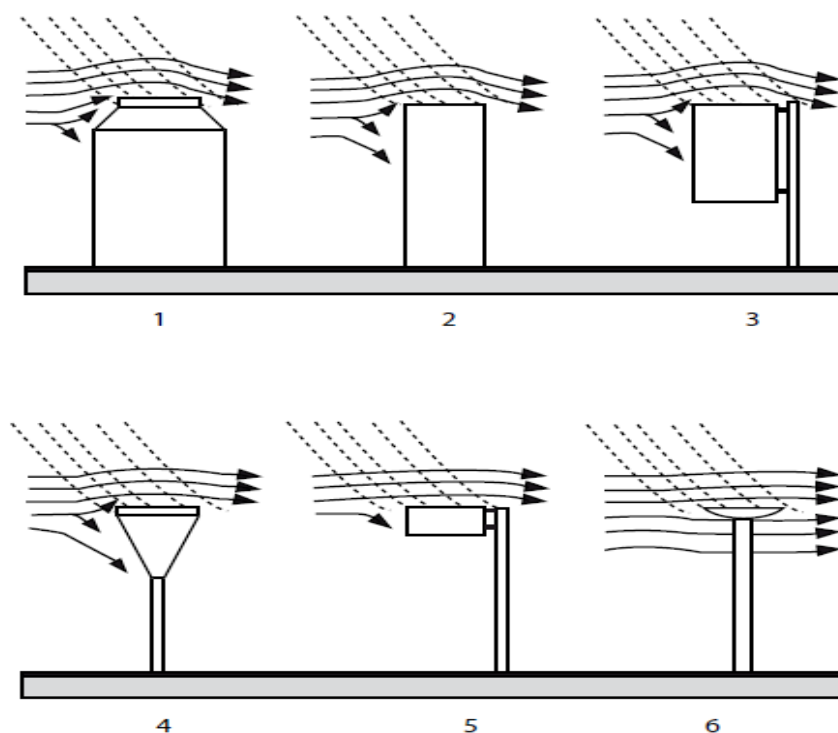
**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

trajetória do vento, que pode originar um excesso ou défice na quantidade de precipitação registada (WMO, 2008a: I.3-1). As perturbações originadas pelos obstáculos circundantes, sobre as trajetórias do vento e das partículas de precipitação, dependem das suas dimensões lineares sendo possível reduzir essas perturbações através da escolha prudente do local de instalação do udógrafo. Desta forma, é pretendido que a velocidade do vento, ao nível do plano da boca do udógrafo, seja a menor possível e os obstáculos circundantes ao udógrafo não interfiram nem alterem a velocidade do vento nem a quantidade de precipitação registada.

A Figura 16 representa a trajetória das partículas de precipitação tendo em conta a ação do vento, e as diferentes trajetórias do vento a atuar nos diferentes modelos de udógrafos colocados a uma determinada altura acima do nível do solo. Estes normalmente são posicionados a uma determinada altura (entre 0,5 e 1,5 m) (WMO, 2008b: I.6-2) com os propósitos de: manter o constante nivelamento do equipamento, não ocorra salpicos de materiais indesejados para o interior do equipamento e, que a velocidade do vento seja a menor possível pois esta aumenta com a altura, aumentando, conseqüentemente, os erros de medição (WMO, 2008a: I.3-2).

Através dessa mesma figura é possível observar que, os tipos de udógrafos representados em 1, 2 e 3 (de maiores dimensões) possuem um maior campo de deformações provocados pelo vento, originando desvios na trajetória das partículas de precipitação que acabam por não serem registadas, resultando no acréscimo de erros na amostra. Nos tipos de udógrafo representados em 4, 5 e 6, o campo de deformação do vento é menor, diminuindo, também os erros de registo de precipitação. Segundo Sevruk *et al.* (2009: 376) e WMO (2008b: I.6-4) é possível afirmar que o efeito do vento também varia conforme o modelo de aparelho registador adotado na medição de precipitação.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**



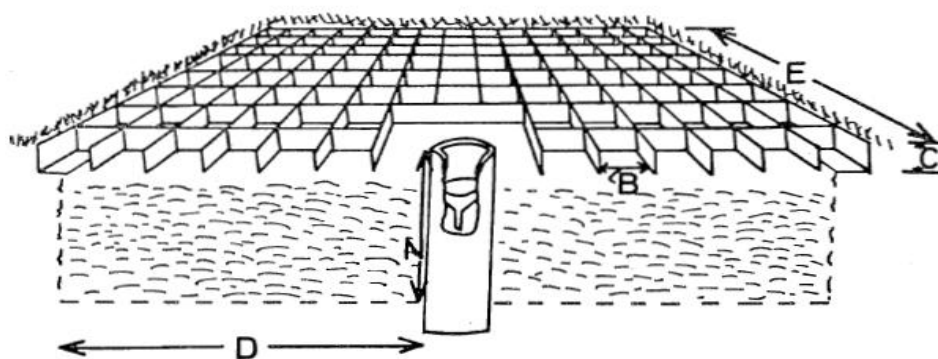
**Figura 16.** Diferentes recipientes de registo de precipitação. As linhas contínuas representam as linhas de fluxo do vento e as linhas a tracejado demonstram a trajetória que as partículas de precipitação tomam conseqüente à ação do vento (WMO, 2008b: I.6-4).

De maneira a reduzir os erros provocados pelo vento nas amostras de precipitação é permitido modificar certos parâmetros do equipamento medidor, como por exemplo a colocação de uma proteção de vento, a forma da boca do medidor, a área de contato da chuva, etc., de forma a controlar o campo de deformações do vento em redor do equipamento medidor e, conseqüente, variação nos valores de precipitação obtidos (Sevruk, 1996: 238).

A colocação do udógrafo ao nível do solo surgiu a partir de estudos para a medição de precipitação líquida e sólida por todo o mundo. Este equipamento é considerado um instrumento de referência na medição de precipitação porque, ao se situar ao nível do solo, sofre um menor efeito do campo de deformações do vento resultando na menor existência de erros na medição de precipitação. Por essa razão este equipamento ser utilizado na comparação quantitativa de precipitação. Frequentemente, o registo de precipitação é maior num udógrafo colocado no solo do que noutra colocado a uma determinada altura (WMO, 1984).

Na Figura 17 está representada a recomendação pela WMO para a instalação de um udógrafo no solo.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**



**Ground level rain gauge  
with grid over pit.**

**N = 30.5 cm (12.0")**  
**B ≥ 5 cm (1.97")**  
**C ≥ 5 cm (1.97")**  
**D ≥ 60 cm (23.6")**  
**E ≥ 60 cm (23.6")**

**Figura 17.** Representação de fosso utilizado para instalação de udógrafo no solo e respectivas dimensões de grelha (WMO, 1984: 109).

Na instalação do equipamento medidor de precipitação no solo é recomendado cumprir os requisitos seguintes (WMO, 1984: 22-23):

- ✓ o fosso deverá ter dimensões mínimas de 120x120 (cm) com uma profundidade de 30,5 cm;
- ✓ o fundo do fosso deverá ser coberto de gravilha com o intuito de facilitar a drenagem;
- ✓ as paredes do fosso podem ser de madeira ou de qualquer outro material adequado a manter a resistência das paredes;
- ✓ o fosso deverá ser coberto por uma grelha metálica ou de um plástico rígido com menos de 3mm de espessura, de modo a evitar salpicos para o interior;
- ✓ o local circundante ao fosso deverá ser nivelado, por uma distância de 30 m, coberto por "relva rasteira" e sem quaisquer obstáculos circundantes (e.g. árvores, arbustos ou edifícios) que possam interferir com a medição de precipitação e velocidade do vento.

Na elaboração do estudo para os dois locais da ilha da Madeira, apesar do recinto de instalação dos udógrafos do solo ser privado, a preparação de um fosso seria dificultada por não haver capacidade de efetuar drenagem deste (local de instalação em solo plano). Desta forma, foi decidido colocar os udógrafos em solo nivelado com uma rede em redor, de modo a evitar salpicos de materiais indesejados e o crescimento de ervas daninhas (ver Figura 14). Apesar da instalação dos

udógrafos não tenha ocorrido segundo o recomendado pela WMO e outros investigadores (Figura 17), a obtenção dos resultados supõe-se semelhante porque o local circundante à instalação do equipamento não possuía quaisquer equipamentos que interferisse com a medição do aparelho (e.g. árvores, arbustos ou edifícios), o equipamento encontrava-se nivelado e o solo circundante ao aparelho estava coberto por “relva rasteira”, reduzindo o efeito do vento ao nível da boca do aparelho.

É de referir que, neste estudo dar-se-á maior importância aos métodos e correções aplicadas na correção de precipitação líquida porque, embora na ilha da Madeira ocorram outras formas de precipitação significativas (e.g. precipitação oculta, neve, granizo, orvalho, geada), esta é a que surge maioritariamente das vezes e, além disso, não se possuía equipamento especializado para medição de precipitação no estado sólido.

De seguida serão referidos modelos de comparação e correção de precipitação usados por muitos investigadores, com a finalidade de revelar as causas originárias do défice / excesso de registo de precipitação e como seria possível fazer uma estimativa do verdadeiro valor de precipitação.

### **III.3. Modelos de comparação e correção de precipitação**

#### **III.3.1. Correção de precipitação para diferentes tipos de udómetros / udógrafos**

Devido à variedade de equipamentos de medição de precipitação, a WMO sentiu necessidade de desenvolver quatro estudos internacionais de comparação de precipitação (três dos quais são referentes à precipitação líquida) com o intuito de, através do uso de diferentes modelos de udómetros / udógrafos, poder estabelecer referências normalizadas relativo à precisão da medição de precipitação e correção sistemática dos erros que poderiam surgir nas amostras, contribuindo, desta forma, na resolução básica de problemas e, no fim, obter uma estimativa da verdadeira quantidade de precipitação. De seguida serão descritos, resumidamente, as comparações de precipitação líquida efetuadas e respetivas conclusões. Não se irá dar relevância, neste estudo, à comparação III (referente à comparação de precipitação sólida entre diferentes modelos de equipamentos de medição) por causa da razão anteriormente referida.

### **III.3.1.1. Comparação I – precipitação (1955 – 1975)**

Estudo efetuado pela WMO e a Associação Internacional das Ciências Hidrológicas com o objetivo de obter coeficientes de redução entre diferentes tipos de udómetros / udógrafos utilizados em vários países, como a Bélgica, Checoslováquia, Hungria, Israel, Estados Unidos da América (EUA) e a Rússia. Nesta comparação foi utilizado como referência, o udómetro de captação de precipitação sólida, equipado com protetor de vento modificado e posicionado a 1m de altura do nível do solo. No entanto, embora o equipamento estivesse protegido, este esteve sempre sujeito a um considerável campo de deformação do vento, não sendo possível obter o valor real da quantidade de precipitação. Por isso, neste estudo, não foram obtidos resultados conclusivos (Sevruk *et al.*, 2009: 377-378).

### **III.3.1.2. Comparação II – precipitação (1972 – 1976)**

A segunda comparação efetuada com o propósito de avaliar fatores de correção do vento e desenvolver correções referente aos erros sistemáticos, utilizando um udómetro / udógrafo ao nível do solo (Sevruk *et al.*, 2009: 377-378). Neste estudo foram utilizadas estações básicas de vinte e dois países, entre os quais Austrália, Finlândia, Rússia, Bulgária, Dinamarca, Roménia, Suécia, Suíça e EUA. Posteriormente, este estudo também foi um suporte muito importante para a elaboração de outros estudos mais sofisticados baseados na simulação numérica do campo de deformações do vento (em laboratório) (Nešpor, 1995; Nešpor *et al.*, 1999; Habib *et al.*, 1999).

### **III.3.1.3. Comparação IV – intensidade de precipitação (2004-2008)**

A quarta investigação efetuada pela WMO com os objetivos principais de prosseguir os estudos para obtenção de um procedimento normalizado de calibração dos equipamentos (e.g. verificação do desempenho dos diferentes modelos de equipamentos) e obtenção de uma comparação (mais significativa) de precipitação entre diferentes registadores de precipitação, de modo a tornar as séries mais homogéneas, principalmente, em casos de elevada pluviosidade. O registo dos dados foi efetuado em intervalos de referência de 1 minuto (como recomendado pelo

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

CIMO<sup>16</sup>). Este estudo foi efetuado usando os registos de precipitação de quinze países, entre os quais Austrália, Áustria, Canadá, República Checa, Finlândia, França, Alemanha, Índia, Itália, Japão, Noruega, Eslováquia, Suíça, Reino Unido e EUA (Lanza *et al.*, 2005: 542; Sevruk *et al.*, 2009: 377-378).

Na realização das comparações II e IV, a WMO concluiu que (Sevruk *et al.*, 2009):

1. as características dinâmicas e a sincronização entre udómetros são consideradas fatores críticos (numa escala de tempo de 1 minuto) na determinação correta da intensidade da precipitação;
2. as perdas por evaporação e formação de humidade nas paredes do aparelho medidor podem estar compreendidas entre 4 – 6%, dependendo do tipo de equipamento, da altitude e da latitude do local de instalação;
3. as perdas de precipitação dependem da intensidade da precipitação, da morfologia do equipamento medidor (e.g. equipamentos mais simples têm tendência a assimilar, mais facilmente, erros sistemáticos. Equipamentos com *software* são os mais indicados por introduzirem menos erros à amostra (Lanza *et al.*, 2005)) e ao campo de deformações do vento em redor e no interior do equipamento medidor.

Posteriormente, Sevruk (1996) elaborou um estudo no Aeroporto de Génova, com a intenção de comparar a diferença de precipitações de diferentes equipamentos usando dados de precipitação de 1980 - 1985 (6 anos seguidos). Nesse estudo, a principal ideia retirada da avaliação dos dados é que quanto maior for a velocidade do vento, menor será a intensidade de precipitação e, conseqüentemente, os erros associados, no total de precipitação registada, são maiores (Sevruk, 1996).

Relativamente recente, um estudo efetuado por Devine *et al.* (2008: 226), onde foram utilizados três equipamentos medidores de modelos diferentes, também comprova que, para diferentes modelos de udómetros / udógrafos, existe uma grande variedade de dados obtidos, evidenciando todos eles, inclusive os equipamentos instalados ao nível do solo, a presença de erros sistemáticos e, conseqüente, menor registo de precipitação. Desta forma, para a obtenção de um registo de precipitação fiável seria mesmo necessário acrescentar correções a todos os equipamentos.

---

<sup>16</sup> *Commission for Instruments and Methods of Observation*, i.e., Comissão para Instrumentos e Métodos Observacionais.

Regra geral, todos estes estudos efetuados pela WMO e associados e outros que não foram possíveis de ser inseridos neste capítulo, contribuíram consideravelmente para a resolução de problemas relacionados com a precisão dos valores registados pelos equipamentos, sendo a utilização de equipamentos de referência (udómetros instalados ao nível do solo) uma grande ajuda para desenvolver procedimentos de correção de erros sistemáticos e, desta maneira contribuir para obtenção dados de precipitação mais fiáveis, verificação do desempenho e calibração dos aparelhos registadores (Sevruk *et al.*, 2009: 380).

### **III.3.2. Equações de correção de precipitação**

Após vários estudos de comparação de precipitação com diferentes tipos de aparelhos, muitos investigadores basearam-se nestes para desenvolver equações de correção de precipitação de uma maneira simples e rápida, tendo em consideração os erros sistemáticos locais e a ação aerodinâmica.

#### **III.3.2.1. Organização Mundial de Meteorologia (WMO)**

Segundo WMO (1989: 19) e o WMO (2008b: I.6-7), a equação geral de correção de precipitação dum determinado local é representada pela equação seguinte:

$$P_k = kP_c = k \left( (P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4) + \Delta P_r \right) \quad (1)$$

onde:  $P_k$  – Precipitação corrigida [mm];

$k$  – Fator corretivo tendo em conta efeito do vento [-];

$P_c$  – Precipitação captada pelo udógrafo [mm];

$P_g$  – Precipitação medida pelo udógrafo [mm];

$\Delta P_{1-4}$  – Correções associadas à humidade existente nas paredes internas do udógrafo e nas básculas, à evaporação, aos salpicos das gotas da chuva para dentro ou para fora do udógrafo (“*splash in / out*”) e pela queda de neve [mm];

$\Delta P_r$  – Erros aleatórios observacionais e instrumentais [mm].

O fator corretivo  $k$  e as correções associadas aos erros locais ( $\Delta P_{1-4}$ ) podem ser estimados através de testes laboratoriais ou por recolha de dados *in situ*. De uma

maneira muito simplista, a percentagem dos erros locais ( $\Delta P_{1-4}$ ), usada na correção de precipitação, pode ser observadas na Tabela 1, deste capítulo.

A WMO (2008b: I.6-7) afirma que, de um modo geral, na utilização deste tipo de correção (equação (1)) é necessário recorrer a outros dados complementares, como a velocidade do vento ao nível da boca do aparelho medidor, o tamanho das gotas de chuva, a intensidade de precipitação, a humidade e temperatura do ar, com a intenção de efetuar ajustamentos à fórmula, embora dados relativos à velocidade do vento e à intensidade de precipitação sejam suficientes para a elaboração da correção da precipitação. Este modelo de correção pode ser usado para dados de precipitação diários, mensais ou, até mesmo, em certos casos, para eventos de precipitação singulares.

Complementar a esta equação, outros autores como Førland *et al.* (1996), Yang *et al.* (1998) e Yang *et al.* (2001) sentiram necessidade de desenvolver vários estudos para encontrar o fator corretivo (k) para diferentes aparelhos medidores, com a intenção de facilitar a correção de precipitação através da aplicação de uma equação, podendo esta ser dependente de um ou mais fatores.

### **III.3.2.2. Yang *et al.* (1998) e Yang *et al.* (2001)**

Entre 1982 e 1983, Yang *et al.* (1998) elaborou um estudo de ajustamento de precipitação diária para condições defeituosas de registo devido à ação do vento e por perdas associadas à formação de humidade. O estudo foi efetuado em 10 estações de medição do *U.S. National Weather Service*<sup>17</sup>, na região do Alasca, sendo utilizado o “8-inch standard gauge”, i.e., um equipamento medidor padrão de 8 polegadas, alguns com e sem escudo protetor à ação do vento.

Através da análise dos dados, Yang *et al.* (1998: 243) chegaram à equação do rácio de captação de precipitação diária [R, unidimensional], que deriva das anteriores comparações elaborada pela WMO entre diferentes tipos de precipitação, em função da velocidade diária do vento ao nível da boca do equipamento [ $v_{vg}$ , m/s], representado nas equações (2) e (3).

$$R_{\text{com proteção}} = \exp(4,606 - 0,041v_{vg}^{0,69}) \quad (2)$$

$$r^2 = 0,18$$

---

<sup>17</sup>Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

$$R_{\text{sem proteção}} = \exp(4,605 - 0,062v_{\text{vg}}^{0,58}) \quad (3)$$

$$r^2 = 0,27$$

Posteriormente, o *Journal of Hydrometeorology* publicou um artigo de Yang *et al.* (2001) onde estes corrigem a medição da precipitação diária em défice, tendo em conta a ação do vento e o registo de precipitação, em cerca de 61 estações climáticas nas regiões da Sibéria, entre 1986 e 1992, onde usaram um udógrafo modelo “Tretyakov”.

Na procura do melhor ajuste dos dados recolhidos por este equipamento específico, obtiveram a equação (4) que diz respeito ao rácio da captação de precipitação diária R [=valor registado / valor obtido por um mesmo aparelho com escudo de proteção à ação do vento; unidimensional] em função da velocidade do vento ( $v_{\text{vg}}$ , m/s).

$$R_{\text{precipitação}} = 100 - 4,77v_{\text{vg}}^{0,56} \quad (4)$$

$$r^2 = 0,47$$

Na utilização da regressão e avaliação dos dados, segundo Yang *et al.* (1998: 241) e Yang *et al.* (2001), chegaram à conclusão:

1. Os fatores de ajuste de correção mensais diferem consoante o local de instalação, o tipo de precipitação e o modelo de equipamento utilizado;
2. Embora todos os fatores sejam importantes (e.g. erros associados à formação de humidade nas paredes do udómetro, erros associados ao aparelho, etc.), a ação do vento é a causa mais significativa na introdução de erros em precipitações de menor intensidade;
3. Ocorre um maior ajuste aos dados, para equipamentos sem escudo de proteção à ação do vento e que se situam ao nível do solo do que, para equipamentos com escudo de proteção e que se situam a uma determinada altura acima do solo (ver equações (2) e (3));
4. A utilização de um fator corretivo (k) constante, na obtenção do valor de precipitação mensal, leva a uma significativa correção, em defeito, para locais onde a velocidade do vento é intensa e uma correção, em excesso, para locais de velocidade de vento baixa;
5. Os ajustes referentes aos erros de precipitação, tanto para o Alasca como para a Sibéria, aumentaram significativamente no valor total registado, anualmente.

### III.3.2.3. Hsu *et al.* (2005)

Hsu *et al.* (2005) efetuou um estudo, usando uma estação meteorológica da Universidade Nacional da Ciência e da Tecnologia em Pingtung (República da China – Taiwan), com o intuito de estudar o efeito da velocidade do vento na medição da precipitação durante tempestades e tufões, num registo em intervalos de 10 minutos. Para este estudo foram utilizados dois pluviómetros: um pluviómetro padrão situado no solo e outro modificado exposto a cinco direções de vento. As fórmulas utilizadas neste estudo foram:

**Tabela 2.** Quadro-resumo das fórmulas utilizadas no estudo das perdas de precipitação pelos pluviómetros, considerando a ação do efeito do vento (baseado em Hsu *et al.*, 2005: 82-83)

Fórmulas	Componentes	
$P_V = \sqrt{(P_N - P_S)^2 + (P_E - P_W)^2}$	$P_V$ - medição de precipitação esperada tendo em conta as 4 direções principais do vento [mm]; $P_N$ - precipitação proveniente de norte [mm]; $P_S$ - precipitação proveniente de sul [mm]; $P_W$ - precipitação proveniente de oeste [mm]; $P_E$ - precipitação proveniente de este [mm]	(5)
$P_T = \sqrt{P_V^2 + P_H^2}$	$P_T$ - total de precipitação esperada tendo em conta as cinco direções do vento [mm]; $P_H$ - precipitação que cai na vertical (de cima para baixo) [mm]	(6)
$\tan(i) = P_V/P_H$	$i$ - ângulo da queda de precipitação em comparação com a superfície do solo	(7)
$D = \left(1 - \frac{\text{medição do pluviómetro padrão}}{\text{medição do pluviómetro modificado}}\right)$	$D$ - rácio das perdas de precipitação [-]	(8)

Resumidamente, os resultados obtidos no estudo demonstram que a taxa de perdas de precipitação aumenta quando a intensidade média do vento aumenta e / ou a intensidade da chuva diminui. Quando a intensidade de precipitação é superior a 10 mm/h e a intensidade média do vento é inferior ou igual a 2 m/s, a taxa de perdas de chuva é cerca de 4%; quando a intensidade média de vento é igual a 10 m/s, a taxa de perdas de precipitação é cerca de 17%. Durante tempestades e tufões: quando a intensidade média do vento é, aproximadamente, igual a 10 m/s, a taxa de perdas de chuva é cerca de 19%; quando a intensidade média de vento é igual a 18 m/s, a taxa de perdas de precipitação é cerca de 43%.

Embora elaborado em outro local do mundo, esta é uma das conclusões obtidas por Yang *et al.* (1998) e Yang *et al.* (2001), quando elaboraram o estudo no Alasca e na Sibéria, fazendo com que toda a informação e todas as conclusões obtidas fossem validadas.

### III.3.2.4. Førland *et al.* (1996)

Førland e outros investigadores, pertencentes a um grupo de trabalho de estudos referentes à precipitação nos países nórdicos (NWGP<sup>18</sup>), coordenaram um relatório com a finalidade de expor métodos operacionais de correção de precipitação registada em vários tipos de estações, tendo em consideração estações meteorológicas, manuais e automáticas, bem equipadas, com medidas extensivas às estações simples com apenas um único elemento medido uma vez por dia. Neste relatório estão mencionados métodos prévios de correção de erros causados pelo efeito aerodinâmico, evaporação e outros, que surgem nos registos de precipitação nórdica (Førland *et al.*, 1996).

Anteriormente, os modelos de avaliação do fator corretivo (k) usado nos países nórdicos, para diferentes tipos de equipamentos, foram os seguintes:

1. Na Dinamarca, Allerup *et al.* (1980) elaboraram um modelo de correção de precipitação líquida para uma estação Hellmann sem proteção contra vento.

$$k = \exp\left(-0,00101 \ln\left(\frac{I_p}{10}\right) - 0,0082v_v \ln\left(\frac{I_p}{10}\right) + 0,042v_v\right) + 0,01 \quad (9)$$

onde:  $I_p$  - Intensidade de precipitação (mm/h);  $v_v$  - velocidade do vento (m/s) medido a 10 m de altura.

2. Na Finlândia, Solantie (1985) propôs a equação (10) para a correção de precipitação líquida:

$$k = 1/(1 - 0,0149v_v) \quad (10)$$

onde  $v_v$  - velocidade do vento (m/s) medido a 10 m de altura.

3. Na Suécia, Dahlström (1973) desenvolveu a seguinte equação para precipitação líquida:

$$k = 1 + 0,002v_v^2 \quad (11)$$

onde  $v$  - velocidade do vento (m/s) medido a 10 m de altura.

Algumas das fórmulas acima reveladas são formuladas tendo em consideração a velocidade do vento medida ao nível da boca do equipamento medidor pois, ao contrário da medição do vento efetuada a 10 m de altura, facultam a vantagem, que a

---

<sup>18</sup> Nordic Working Group on Precipitation

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

influência do terreno na perturbação da velocidade do vento possa ser ignorada (Førland *et al.*, 1996: 23).

Atualmente, o modelo dinâmico modificado de Førland para a correção de precipitação líquida é representado pela equação (12). Este modelo resulta de uma transformação da equação (9). Este modelo é elaborado tendo em atenção a medição da velocidade do vento à boca do udógrafo/udómetro pela razão referida no parágrafo anterior.

$$k = \exp(-0,00101 \ln(I_p) - 0,012177 v_{vg} \ln(I_p) + 0,034331 v_{vg} + 0,007697 + c) \quad (12)$$

onde  $I_p$  - Intensidade de Precipitação (mm/h);  $v_{vg}$  - velocidade do vento à boca do udómetro/udógrafo (m/s);  $c$  - coeficiente referente ao aparelho medidor (neste caso,  $c$  é igual a zero).

## Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal

---

### IV.1. Introdução

O efeito do vento a atuar na medição/registo da precipitação tem sido, desde há dois séculos e meio, razão para muitos estudos com a principal intenção de, através da redução da percentagem dos erros, conseguir estimar a “real” quantidade de precipitação que cai num determinado local (Chvíla *et al.*, 2005: 30; Wagner, 2009: 6).

No presente capítulo serão descritos a metodologia, resultados e discussão destes tendo em consideração a análise do efeito do vento no registo/medição quantitativa de precipitação em dois locais da ilha da Madeira (Pico do Areeiro e Funchal), com a finalidade de, através de uma análise estatística ANOVA do SPSS, estimar as equações do fator corretivo de precipitação ( $k$ ), tendo em conta o efeito do vento e a intensidade de precipitação registados na ilha.

### IV.2. Metodologia e materiais

#### IV.2.1. Áreas de registo de precipitação

Para o estudo do efeito do vento na medição de precipitação, recorreu-se à instalação de udógrafos em dois locais na ilha da Madeira: no Pico do Areeiro e no Funchal. A escolha destes locais deveu-se, essencialmente, a diferenças nas características climáticas existentes em cada local (anteriormente, referido no Capítulo I) e devido a existência de recinto de instalação por parte do Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA).

##### IV.2.1.1. Pico do Areeiro

Situado a uma latitude  $32^{\circ} 43'N$  e longitude  $16^{\circ} 55'W$ , o posto do Pico do Areeiro encontra-se a uma altitude de 1600 m, na zona central da ilha da Madeira. Este posto encontra-se exposto durante todo o ano, a temperaturas médias baixas (comparando com as temperaturas da restante ilha) e a valores de pluviosidade e de humidade relativa do ar elevados (ver Capítulo I).



**Figura 18.** Localização do posto de registo de precipitação do Pico do Areeiro

#### **IV.2.1.2. Funchal**

Localizado a uma latitude  $32^{\circ} 38'N$  e longitude  $16^{\circ} 54'W$ , o posto do Funchal encontra-se situado na zona sul da ilha, a uma altitude de 58 m.

No Funchal, as temperaturas médias anuais são das mais elevadas da ilha, a queda de precipitação é muito menor do que no Pico do Areeiro (Prada *et al.*, 2005: 3) e os valores de humidade do ar são considerados baixos (inferior a 75%) (Plano Regional da Água da Madeira, 2003: 46). Nesta zona da ilha existe ainda, uma dispersão razoável do vento pelos 8 octantes (rumos) originado pelo movimento de recirculação horizontal de ar (ver nota 5) (Santos *et al.*, 2006: 17).



**Figura 19.** Localização do posto de registo de precipitação do Funchal (IPMA)

## IV.2.2. Registo da precipitação

### IV.2.2.1. Comparação entre registos de precipitação e formulação de equações

Como fora referido no Capítulo II, a medição de precipitação, para este estudo, foi efetuada a partir da utilização de um udógrafo ao nível do solo (modelo *Rain Collector II – Davis*) com recetáculos basculantes de capacidade 0,2 mm e com possibilidade de registar continuamente a intensidade da precipitação, através de um mecanismo magnético conectado a um *data logger* (modelo HOB0 Pendant® Event Data Logger). O *data logger* estava programado para registar o número de movimentos dos recetáculos em intervalos de 10 minutos, sincronizado pelo relógio do computador utilizado na configuração dos aparelhos e estes, por sua vez, estavam sincronizados via internet. Os dados foram recolhidos via USB para o computador através do *software* HOBOWARE, sendo posteriormente exportados e tratados em Microsoft Excel.

Para comparar os valores obtidos nos locais em estudo, foram utilizados os registos dos udógrafos do IPMA desses mesmos locais. Os udógrafos do IPMA estão instalados a 1,5 m acima do solo (Figura 20) e possuem, também, um sistema de recetáculos basculantes, semelhante ao do udógrafo colocado ao nível do solo sendo que, cada basculamento representa 0,1 mm de precipitação que cai nesse local.



Figura 20. Udógrafo do IPMA

## Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal

Como o recinto de instalação dos udógrafos do solo é privado e como a preparação de um fosso seria dificultada por não haver capacidade de efetuar drenagem deste, foi decidido colocar os udógrafos em solo nivelado com uma rede em redor, de modo a evitar salpicos de materiais indesejados (ver Figura 14). Apesar da instalação dos udógrafos não tenha sido segundo o recomendado pela WMO e outros investigadores (ver Figura 17), a obtenção dos resultados seria semelhante ao que fora obtido neste estudo porque o local circundante à instalação do equipamento não possuía quaisquer obstáculos que interferisse com a medição do aparelho (e.g. árvores, arbustos ou edifícios). O equipamento encontrava-se nivelado e o solo circundante ao aparelho estava coberto por “relva rasteira”.

De forma a poder existir uma comparação mais adequada por causa da dependência de vários fatores (e.g. temperatura do ar, a velocidade do vento e sua direção) em relação ao aparelho registador, muitos autores como Sevruk *et al.* (1984) e Yang *et al.* (1998), sugeriram a utilização de intensidades de precipitação iguais ou superiores a 0,3 mm (em intervalos de 10 minutos), visto poder existir uma grande variação no rácio de captura<sup>19</sup> e, dessa maneira introduzir diferenças significativas em pequenos eventos de precipitação aquando na utilização equipamentos de diferentes calibres. Contudo, estes acabam por fazer uma análise dos seus dados, ignorando a sugestão e usando todos os dados obtidos.

No estudo desenvolvido neste capítulo, foi decidido fazer uma análise dos dados de precipitação superiores a 0 mm, em ambos os aparelhos registadores, com o objetivo de evitar grande parte das disparidades existentes nos dados recolhidos. Nestes dados não foram consideradas quaisquer adições de perdas associadas a erros sistemáticos (e.g. evaporação, formação de humidade nas paredes internas do udógrafo) pois caso estas existissem, no intervalo de 10 minutos de registo, seriam muito pequenas logo, por essa razão, foram desprezadas.

Na análise comparativa dos registos de precipitação do udógrafo do solo com o udógrafo do IPMA, foi decidido organizar os dados, inicialmente, por onze classes de vento, desde valores inferiores a 2 m/s até valores iguais e superiores a 20 m/s. Após esta, foi efetuada uma segunda organização de dados, agora referente à precipitação, onde foram separados todos os valores de precipitação que são superiores no udógrafo do solo dos valores que são superiores no udógrafo do IPMA, que se

---

<sup>19</sup> Rácio de captura é entendido como sendo a fração da quantidade de precipitação registada pelo aparelho pelo verdadeiro valor de precipitação que caiu nessa mesma determinada região (WMO, 1984; Yang *et al.*, 1998).

encontra a uma altura de 1,5 m acima do solo. Esta metodologia de comparação de valores de precipitação tem como objetivos observar o efeito do vento no registo de precipitação dos udógrafos e verificar, comparativamente, a variação da precipitação medida por estes.

Após a elaboração da análise anteriormente descrita, e de forma a obter uma avaliação rigorosa dos dados recolhidos no Pico do Areeiro e no Funchal, foi usado o SPSS<sup>20</sup>, recorrendo a uma análise estatística ANOVA<sup>21</sup>, de forma a alcançar duas regressões (uma para cada local). Dessas regressões pretende-se, por meio do uso dos valores da velocidade do vento e da precipitação, obter a estimativa de uma equação do fator corretivo (k) e seu respetivo coeficiente de determinação ( $R^2$  ou  $r^2$ ).

O coeficiente de determinação múltiplo ( $R^2$ ) é definido como sendo a medição percentual da qualidade do ajustamento dos dados à equação definida, representando assim a variação total do fator corretivo estimado (k) (uma variável dependente) em função da intensidade da precipitação ( $I_p$ ) e da velocidade do vento ( $v_v$ ) (duas ou mais variáveis independentes). No caso de ocorrer uma análise de regressão simples (entre uma variável dependente e outra independente), o ajustamento da qualidade dos dados é denominado por coeficiente de determinação simples ( $r^2$ ) (Gujarati *et al.*, 2006: 105). O coeficiente de determinação ( $R^2$  ou  $r^2$ ) adquire valores entre 0 e 1, sendo o valor mais próximo da unidade significar a melhor adaptabilidade ao modelo escolhido (Gujarati *et al.*, 2006: 214). Tal acontece para uma regressão simples ou uma regressão múltipla.

A regressão múltipla é efetuada com os objetivos de: realizar uma previsão usando um ou mais fatores e ainda, facultar uma explicação das teorias em estudo, de modo a fundamentar a correlação entre estes. Neste tipo de análise obtém-se constantes provenientes da relação entre variáveis provenientes do acaso (impossíveis de serem explicadas e com comportamento aleatório) e outras variáveis explicativas (e.g. dados recolhidos, erros sistemáticos do udógrafo e locais, etc.). Daí, no estudo em questão, o fator corretivo (k) seja apenas um valor estimado.

No caso da regressão simples, a variável dependente é resultante, exclusivamente, de um único fator: a variável independente, não havendo outra qualquer razão implícita nos resultados.

---

<sup>20</sup> *Statistical Package for Social Science*, i.e., Programa Estatístico para Ciências Sociais.

<sup>21</sup> *ANalysis Of VAriance*, i.e. Análise de Variância.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

No geral, resultante da equação (1), a equação de correção de precipitação pode ser representada da seguinte forma:

$$P_{\text{corrigida}} = k \cdot P_{\text{registada}} \quad (13)$$

onde:  $P_{\text{corrigida}}$  – precipitação corrigida tendo em conta todos os erros sistemáticos [mm];

$k$  – fator corretivo da precipitação à ação do vento [-];

$P_{\text{registada}}$  – precipitação registada pelo aparelho registador [mm].

Teoricamente, o fator corretivo referente à ação do vento ( $k$ ) também pode ser descrito como sendo

$$k = \frac{1}{R} \quad (14)$$

onde:  $R$  – rácio da precipitação captada pelos udógrafos [unidimensional].

Para além da determinação do coeficiente de determinação ( $R^2$  ou  $r^2$ ) e do fator corretivo, foi efetuada uma ANOVA e uma análise de resíduos de forma a verificar o modelo de equação calculado.

### **IV.3. Resultados e Discussão**

#### **IV.3.1. Comparação entre registos de precipitação**

Na análise dos dados do Pico do Areeiro e do Funchal, de modo a verificar se os valores obtidos no solo são superiores aos que são recolhidos a 1,5 m de altura, foi decidido organizar os dados em onze classes de vento, para posteriormente fazer uma segunda organização de dados, separando quando a quantidade de precipitação recolhida é superior no udógrafo ao nível do solo e quando é superior no udógrafo do IPMA.

##### **IV.3.1.1. Pico do Areeiro**

Nas Tabelas 3 e 4 e nas Figuras 21 e 22, a seguir evidenciadas, estão representadas a análise da velocidade do vento do Pico do Areeiro, tendo em consideração quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo e quando é superior no udógrafo do IPMA, respetivamente.

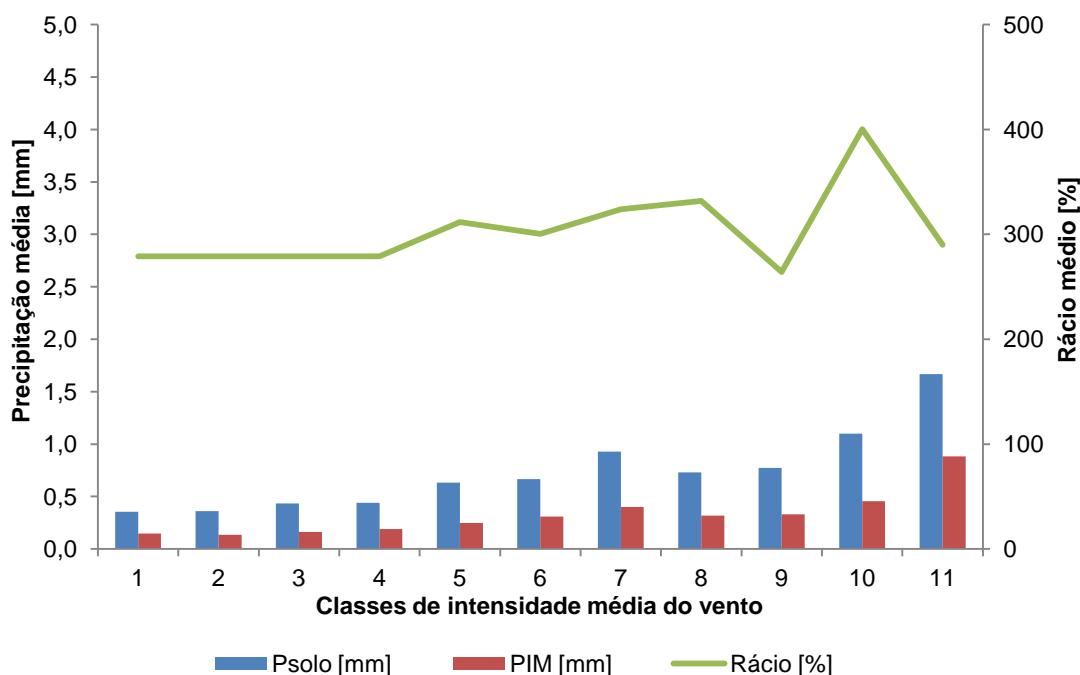
#### IV.3.1.1.1. Quando a intensidade de precipitação é superior no udógrafo do solo

Pela observação da Tabela 3, onde está presente o Rácio [relação entre a quantidade de precipitação registada pelo udógrafo do solo sobre a quantidade de precipitação registada pelo udógrafo do IPMA], verifica-se que, quando a quantidade de precipitação registada é superior no solo, existe uma relação média de 303,5%, i.e., a quantidade registada pelo udógrafo do solo é, em média 3,04 vezes superior à quantidade do udógrafo do IPMA, para um total de 1808 eventos, de 10 minutos de registo.

**Tabela 3.** Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo.

Quadro - resumo para o Pico do Areeiro (udógrafo do solo > udógrafo do IPMA)					
Classes de velocidade do vento	Registo de vento	Registo de precipitação média			Contagem de eventos
	Velocidade média do vento [m/s]	Precipitação do udógrafo do solo	Precipitação do udógrafo do IPMA	Rácio [%]	
		P <sub>solo</sub> [mm]	P <sub>IPMA</sub> [mm]		
1	$v_v < 2 \text{ m/s}$	0,4	0,1	279,0	32
2	$2 \text{ m/s} \leq v_v < 4 \text{ m/s}$	0,4	0,1	279,0	132
3	$4 \text{ m/s} \leq v_v < 6 \text{ m/s}$	0,4	0,2	279,0	182
4	$6 \text{ m/s} \leq v_v < 8 \text{ m/s}$	0,4	0,2	279,0	205
5	$8 \text{ m/s} \leq v_v < 10 \text{ m/s}$	0,6	0,2	311,8	283
6	$10 \text{ m/s} \leq v_v < 12 \text{ m/s}$	0,7	0,3	300,3	336
7	$12 \text{ m/s} \leq v_v < 14 \text{ m/s}$	0,9	0,4	323,9	272
8	$14 \text{ m/s} \leq v_v < 16 \text{ m/s}$	0,7	0,3	331,9	208
9	$16 \text{ m/s} \leq v_v < 18 \text{ m/s}$	0,8	0,3	264,1	96
10	$18 \text{ m/s} \leq v_v < 20 \text{ m/s}$	1,1	0,5	400,2	50
11	$v_v \geq 20 \text{ m/s}$	1,7	0,9	289,9	12
Média		0,7	0,3	303,5	

Na Figura 21, onde está representado graficamente a análise da intensidade média do vento para quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo, verifica-se que à medida que as classes de velocidade do vento aumentam, a quantidade média de precipitação também aumenta, tanto para o udógrafo colocado no solo como para o udógrafo do IPMA, até atingir uma velocidade média de vento entre os 12 e os 14 m/s (classe 7). Na classe 8, referente a uma velocidade do vento entre os 14 - 16 m/s, ocorre uma pequena redução na quantidade de precipitação registada pelos udógrafos e, após a classe 9 - 10 volta a ocorrer um aumento do registo de precipitação.



**Figura 21.** Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo.

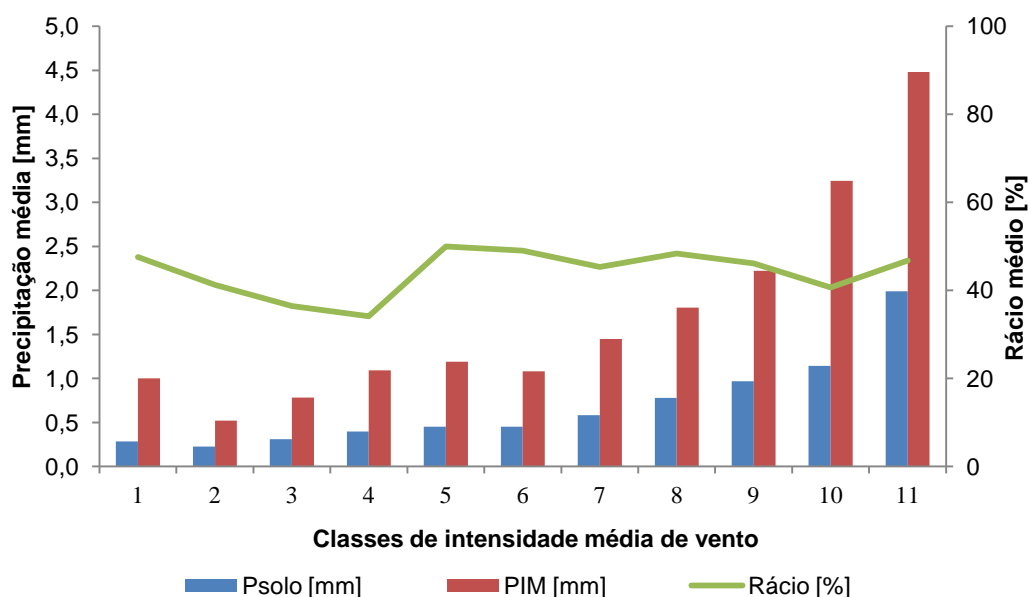
#### IV.3.1.1.2. Quando a intensidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA

Na análise dos dados registados na Tabela 4 e da Figura 22, onde demonstra a análise da intensidade média do vento para quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA, verifica-se que existe, em geral, uma variação crescente da quantificação da precipitação registada nos dois udógrafos à medida que as classes de velocidade do vento aumentam. Porém, a quantidade de precipitação registada no udógrafo do solo é, em média, 44,2% do valor registado pelo udógrafo do IPMA, num total de 1259 eventos de 10 minutos.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

**Tabela 4.** Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA.

Quadro - resumo para o Pico do Areeiro (udógrafo do IPMA > udógrafo do solo)					
Classes de velocidade do vento	Registo de vento	Registo de precipitação média			Contagem de eventos
	Velocidade média do vento [m/s]	Precipitação do udógrafo do solo	Precipitação do udógrafo do IPMA	Rácio [%]	
		P <sub>solo</sub> [mm]	P <sub>IPMA</sub> [mm]		
1	$v_v < 2 \text{ m/s}$	0,3	1,0	47,6	10
2	$2 \text{ m/s} \leq v_v < 4 \text{ m/s}$	0,2	0,5	41,2	50
3	$4 \text{ m/s} \leq v_v < 6 \text{ m/s}$	0,3	0,8	36,5	91
4	$6 \text{ m/s} \leq v_v < 8 \text{ m/s}$	0,4	1,1	34,1	111
5	$8 \text{ m/s} \leq v_v < 10 \text{ m/s}$	0,5	1,2	50,0	183
6	$10 \text{ m/s} \leq v_v < 12 \text{ m/s}$	0,5	1,1	49,0	226
7	$12 \text{ m/s} \leq v_v < 14 \text{ m/s}$	0,6	1,4	45,3	229
8	$14 \text{ m/s} \leq v_v < 16 \text{ m/s}$	0,8	1,8	48,4	162
9	$16 \text{ m/s} \leq v_v < 18 \text{ m/s}$	1,0	2,2	46,1	101
10	$18 \text{ m/s} \leq v_v < 20 \text{ m/s}$	1,1	3,2	40,7	63
11	$v_v \geq 20 \text{ m/s}$	2,0	4,5	46,8	33
<b>Média</b>		0,7	1,7	44,2	



**Figura 22.** Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA.

Muitos autores, como por exemplo Wagner (2009: 6) e WMO (2008a: I.3-2) afirmam que, com o aumento da velocidade do vento há maiores turbulências em redor do aparelho e, conseqüentemente, desvios nas trajetórias de partículas de precipitação levando, dessa maneira, a um menor registo quantitativo da precipitação. Na observação dos gráficos acima representados observa-se que, para o Pico do

Areeiro, embora exista uma pequena redução do registo de precipitação a determinada altura, por razões desconhecidas, o valor da precipitação aumenta, significativamente, com o aumento da velocidade do vento. Resultado inverso ao constatado anteriormente por vários autores da bibliografia que afirmam que, com o aumento da velocidade do vento há diminuição no registo de precipitação. No entanto, tal facto poderá estar associado, para além do excessivo registo de precipitação devido a erros derivados ao aumento da velocidade do vento, a períodos de precipitação intensa com grande velocidade de vento (e.g. intempérie, tempestades).

O mesmo tipo de avaliação será feito para o posto do Funchal com o mesmo intuito de verificar qual o comportamento do udógrafo do solo em relação ao udógrafo do IPMA.

#### **IV.3.1.2. Funchal**

Nas Tabelas 5 e 6 e Figuras 23 e 24, a seguir evidenciadas, é apresentada a análise da velocidade do vento no Funchal, tendo em consideração quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo e quando é superior no udógrafo do IPMA, respetivamente. Aqui nesta parte do estudo foram consideradas apenas quatro classes de velocidade do vento porque o valor máximo de intensidade média registada neste local foi de 9,8 m/s. Seria possível efetuar mais uma classe de velocidade de vento (classe 5) mas, como o número de eventos de precipitação ocorridos com intensidades de vento entre os 8-10 m/s era muito reduzido, foi decidido juntá-los à classe 4, fazendo-os corresponder a valores de velocidade de vento superiores e iguais a 6m/s.

##### **IV.3.1.2.1. Quando a intensidade de precipitação é superior no udógrafo do solo**

Na observação da Tabela 5 e da Figura 23, onde está presente o rácio (linha verde que representa a quantidade de precipitação registada pelo udógrafo do solo sobre a quantidade de precipitação registada pelo udógrafo do IPMA), conclui-se que, quando a quantidade de precipitação registada é superior no solo, existe uma relação média de 480,4%, i.e., a quantidade registada pelo udógrafo do solo é, em média 4,80 vezes superior à quantidade do udógrafo do IPMA, para um total de 299 eventos de 10 minutos de registo.

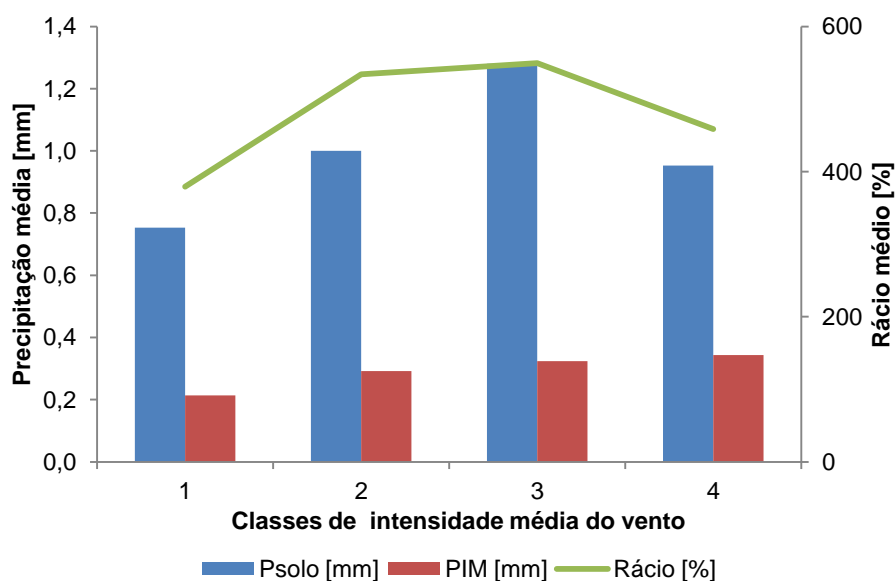
**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

Observando a Figura 23, onde evidencia graficamente a análise da intensidade média do vento para quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo, nota-se que existem apenas 4 classes de intensidade média do vento. Desta afirmação conclui-se que, em comparação com os dados do Pico do Areeiro, a velocidade de vento que atua no Funchal é muito menor, devido à influência de obstáculos (e.g. edificações, árvores) circundantes ao posto de medição do vento e, ao localizar-se a sotavento dos rumos predominantes, a velocidade do vento é mais baixa, comparativamente com as intensidades que ocorrem a barlavento.

Também se verifica que, a quantidade de precipitação do udógrafo do solo aumenta até aos 6 m/s (classe 3) enquanto a quantidade de precipitação do udógrafo do IPMA mantém-se razoavelmente, constante em todas as classes. A partir da classe 3 de intensidade média de vento verifica-se uma redução de precipitação pelo udógrafo do solo.

**Tabela 5.** Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo.

<b>Quadro - resumo para o Funchal (udógrafo do solo &gt; udógrafo do IPMA)</b>					
<b>Classes de velocidade do vento</b>	<b>Registo de vento</b>	<b>Registo de precipitação média</b>			<b>Contagem de eventos</b>
	<b>Velocidade média do vento [m/s]</b>	<b>Precipitação do udógrafo do solo</b>	<b>Precipitação do udógrafo do IPMA</b>	<b>Rácio [%]</b>	
		<b>P<sub>solo</sub> [mm]</b>	<b>P<sub>IPMA</sub> [mm]</b>		
<b>1</b>	<b><math>v_v &lt; 2 \text{ m/s}</math></b>	0,8	0,2	379,2	98
<b>2</b>	<b><math>2 \text{ m/s} \leq v_v &lt; 4 \text{ m/s}</math></b>	1,0	0,3	534,1	130
<b>3</b>	<b><math>4 \text{ m/s} \leq v_v &lt; 6 \text{ m/s}</math></b>	1,3	0,3	549,7	50
<b>4</b>	<b><math>v_v \geq 6 \text{ m/s}</math></b>	1,0	0,3	458,6	21
<b>Média</b>		1,0	0,3	480,4	



**Figura 23.** Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do solo

#### IV.3.1.2.2. Quando a intensidade de precipitação é superior no udógrafo do solo

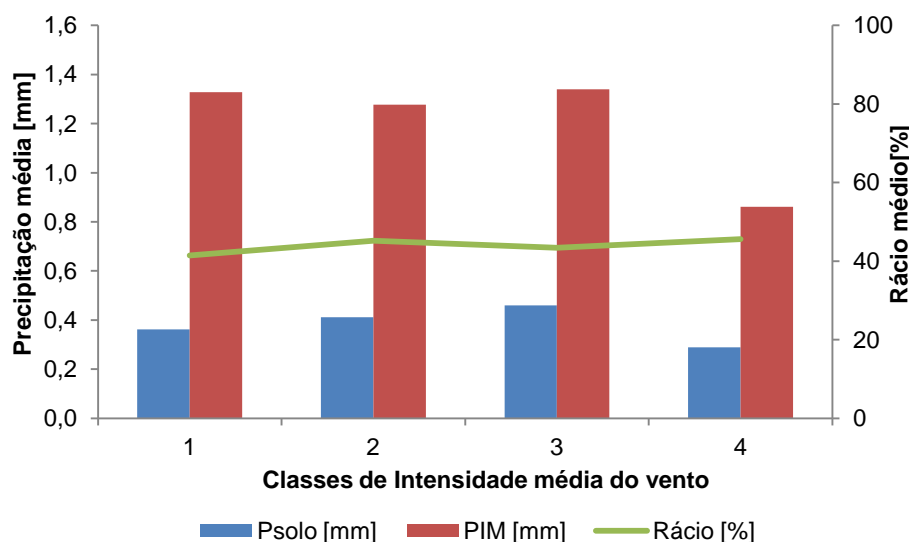
Na avaliação dos dados registados na Tabela 6 e da Figura 24, onde demonstra a análise da intensidade média do vento para quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA, verifica-se que existe, em geral, uma constante quantificação da precipitação tanto no udógrafo do solo como no udógrafo do IPMA até à classe 3 de velocidade de vento. A partir desta, denota-se uma leve redução na quantificação da precipitação registada.

Verifica-se também, pela observação da Tabela 6 que, a quantidade de precipitação registada pelo udógrafo do solo é, em média, cerca de 43,9% do valor registado pelo udógrafo do IPMA, num total de 254 eventos de 10 minutos. Tal significa que, comparando os valores obtidos para o Funchal, o udógrafo do solo regista mais eventos com maior registo de precipitação do que o udógrafo do IPMA mas, quando se fala na comparação quantitativa do registo de precipitação, a quantidade acumulada de precipitação registada pelo aparelho do IPMA continua a ser superior ao que fora registado o udógrafo do solo.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

**Tabela 6.** Quadro-resumo da análise da intensidade média do vento tendo em conta quando a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA.

Quadro - resumo para o Funchal (udógrafo do IPMA > udógrafo do solo)					
Classes de velocidade do vento	Registo de vento	Registo de precipitação média			Contagem de eventos
	Velocidade média do vento [m/s]	Precipitação do udógrafo do solo	Precipitação do udógrafo do IPMA	Rácio [%]	
		P <sub>solo</sub> [mm]	P <sub>IPMA</sub> [mm]		
1	V <sub>v</sub> < 2 m/s	0,4	1,3	41,5	78,0
2	2 m/s ≤ v <sub>v</sub> < 4 m/s	0,4	1,3	45,2	108,0
3	4 m/s ≤ v <sub>v</sub> < 6 m/s	0,5	1,3	43,4	50,0
4	v <sub>v</sub> ≥ 6 m/s	0,3	0,9	45,6	18,0
Média		0,4	1,2	43,9	



**Figura 24.** Análise da intensidade média do vento tendo em conta que a quantidade de precipitação é superior no udógrafo do IPMA.

### IV.3.1.3. Observações

Na observação dos resultados referentes à avaliação dos dados, tanto para o Funchal como para o Pico do Areeiro, conclui-se:

1. Existe maior número de eventos de registo de precipitação superior no udógrafo do solo do que no udógrafo do IPMA;
2. Há maior registo (quantitativo) de precipitação no udógrafo do IPMA em relação com o udógrafo do solo. Este resultado é distinto dos constatados por vários autores citados na bibliografia, que referem que os udógrafos no solo registam volumes de precipitação superiores ao do udógrafo que se encontra a

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

uma determinada altura do solo. O resultado deste estudo pode ter sido afetado por:

- i. Existe a possibilidade de ocorrência de problemas na calibração dos aparelhos situados no solo (e.g. o aparelho tinha sido calibrado na fábrica para corresponder uma basculação a 0,2 mm de precipitação, porém, ocorre dúvidas no que diz respeito à verdadeira quantidade de precipitação que cada basculante suporta antes de esvaziar). No entanto, esta razão poderá ser pouco viável visto que, estes aparelhos, efetuados e certificados segundo as diretrizes da WMO, são sujeitos a testes de calibração antes de serem vendidos aos clientes; e a ocorrência da disparidade de valores de precipitação nos dois aparelhos situados em localizações diferentes, torna pouco provável tal situação ser resultado de erros de calibração;
- ii. Com o uso da capacidade de um basculante diferente ao usado pelo IPMA (o udógrafo do solo possui basculantes de capacidade de 0,2 mm enquanto o udógrafo do IPMA possui uma capacidade de 0,1 mm), poderão estar implícitas algumas das perdas no registo de precipitação no equipamento do solo. O equipamento com capacidade de 0,1 mm tem maior precisão visto que, por ser de menor capacidade pode registar mais do que um equipamento de capacidade 0,2 mm (e.g. para um registo de 0,19 mm, o udógrafo de menor capacidade é capaz de registar uma basculação, sendo o restante, i.e. os 0,09 mm, evaporado enquanto, que para o udógrafo de maior capacidade este total seria evaporado visto que este não atingiu a capacidade total para efetuar uma basculação). Por essa razão se afirmar que, os equipamentos com basculantes de maior capacidade são os que apresentam maiores erros de registo;
- iii. Uso de aparelhos de diferentes modelos pode acrescentar certos erros de medição (o aparelho situado ao nível do solo é de modelo diferente ao do aparelho do IPMA), como fora provado pelos autores citados na bibliografia;
- iv. Instalação indevida dos equipamentos: a instalação dos aparelhos foi realizada da melhor forma possível, tendo em conta o recinto de instalação do aparelho (e.g. o aparelho do solo situado no IPMA estava posicionado, permanentemente, num suporte, enquanto o aparelho do Pico do Areeiro era constantemente nivelado, com auxílio de uma pequena estrutura de madeira (ripas), sempre que fosse necessário

recolher os dados). No entanto, há sempre o risco da instalação poder ter sido indevida.

À partida, na comparação dos dados originais fornecidos pelo IPMA, o valor médio de velocidade do vento mais alto atingido no Funchal foi de 9,8 m/s (aproximadamente 35,3 km/h), enquanto na zona do Pico do Areeiro o valor médio de velocidade do vento mais alto foi de 25,9 m/s (aproximadamente 93,3 km/h). A partida pode-se afirmar que a zona do Pico do Areeiro é propícia a velocidade de vento elevado, em comparação com o Funchal, porque o vento, ao subir a encosta ingreme até ao topo da montanha a barlavento, sofre compressão e, conseqüentemente, um aumento significativo da velocidade do vento. No entanto, a sotavento, à medida que se afasta do topo da montanha, a turbulência diminui de intensidade, diminuindo também a velocidade do vento (Tomé, 2007). Por essa razão é que a velocidade do vento no Pico do Areeiro é maior do que no Funchal.

#### **IV.3.2. Equações de correção de precipitação**

Na escolha do modelo de equação do fator corretivo (k) a ser realizado adotou-se como referência, a equação (12) do Capítulo III, descrita por Førland *et al.* (1996: 40). A escolha deste modelo deveu-se por causa da boa adaptação dos dados à equação ( $R^2=0,542$  e  $r^2=0,576$ ), por serem das únicas equações que tinham em consideração a velocidade do vento e a intensidade da precipitação no cálculo do fator corretivo, e porque, realmente através de outros estudos realizados por várias partes do mundo a intensidade de precipitação juntamente com a velocidade do vento podem alterar significativamente a quantidade de precipitação registada pelos aparelhos. Ao possuir coeficientes de determinação a rondar os valores, anteriormente, referidos significa que cerca de 54 e 58% dos dados recolhidos são adaptáveis às equações formuladas.

Na aplicação do SPSS obteve-se uma estimativa dos fatores corretivos (k) e respetivos coeficientes de determinação ( $R^2$  ou  $r^2$ ) para os postos do Pico do Areeiro e do Funchal, respetivamente, para intervalos de registo de 10 minutos. Estes fatores corretivos foram determinados tendo em consideração a intensidade de precipitação (mm/h) e da velocidade do vento (m/s), sendo a velocidade do vento medida a 10 m de altura no Pico do Areeiro e a 4,5 m de altura no Funchal. Os coeficientes da equação do fator corretivo (k) e os coeficientes de determinação ( $R^2$  ou  $r^2$ ) poderão ser observados nos Anexos B e C. As equações são apresentadas de seguida.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

$$k_{\text{Areeiro}} = \exp(0,467 - 0,833 \times \ln(I_p) + 0,15 \times (v_v) \times \ln(I_p) + 0,14 \times v_v) \quad (15)$$

$$R^2 = 0,542$$

$$P_{\text{corrigida\_Areeiro}} = k_{\text{Areeiro}} \times P_{\text{registada}} \quad (16)$$

$$k_{\text{intensidade\_precipitação\_Funchal}} = \exp(0,914 - 0,907 \times \ln(I_p)) \quad (17)$$

$$r^2 = 0,576$$

$$P_{\text{corrigida\_Funchal}} = k_{\text{intensidade\_precipitação\_Funchal}} \times P_{\text{registada}} \quad (18)$$

Pela tabela de dados existentes no anexo B, referente aos coeficientes da equação e ao coeficiente de determinação do Pico do Areeiro escolheu-se o Modelo 3 por ser o que melhor se adapta aos dados recolhidos pelos udógrafos, visto ser o que tem o coeficiente de determinação mais próximo da unidade.

Curiosamente, na aplicação deste modelo para os dados do Funchal, usando a análise do SPSS, foi verificado que a velocidade do vento (a 4,5 m de altura) não é uma variável importante na avaliação do fator corretivo para o Funchal e, a única variável significativa é a intensidade de precipitação. Tal facto poderá dever-se à influência das edificações e objetos existentes nas mediações pois este posto situa-se numa zona altamente urbanizada a baixa altitude, e também devido à reduzida velocidade de vento provocada pela recirculação de ar existente no Funchal, principalmente quando os ventos são predominantes de Nordeste.

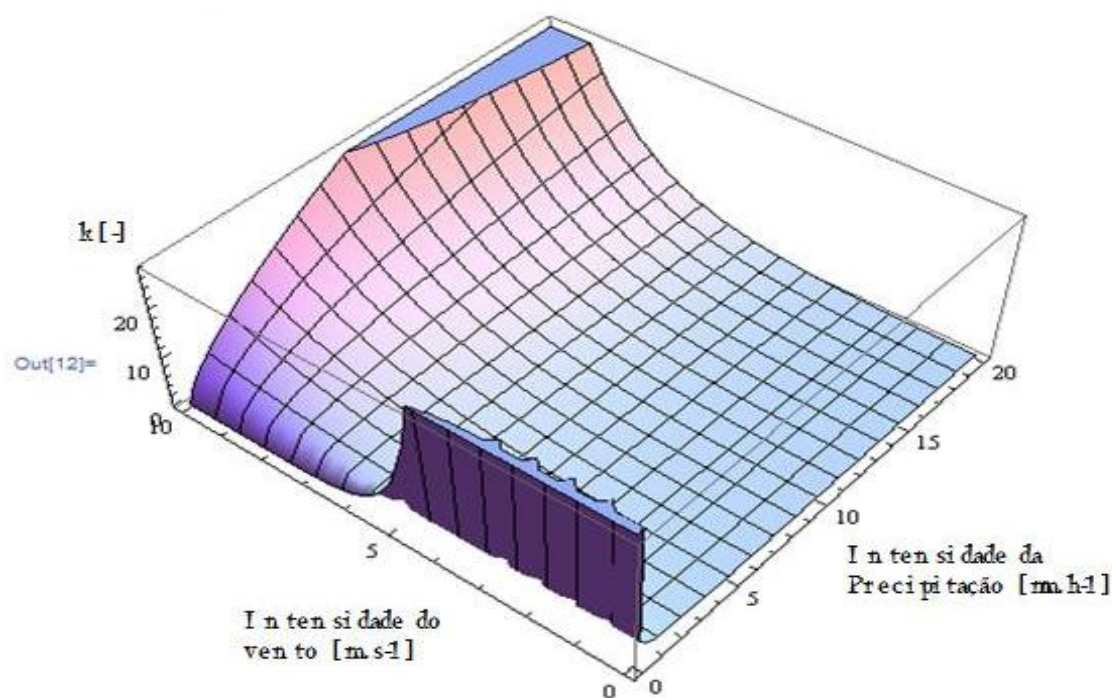
De seguida, representa-se graficamente a relação entre a intensidade da precipitação, a velocidade do vento e o fator corretivo de precipitação (k) para o Pico do Areeiro e do Funchal, respetivamente.

Pela observação das Figuras 25 e 26 verifica-se à partida que a representação gráfica da relação entre a intensidade da precipitação, velocidade do vento e fator corretivo (k) do Pico do Areeiro é a mais complexa, comparativamente com a do Funchal.

Na avaliação da Figura 25, referente ao gráfico da relação entre a intensidade de precipitação, velocidade do vento e fator corretivo (k) é possível observar que, se a intensidade de precipitação tiver valor próximo a zero e, simultaneamente, a velocidade do vento adquirir valores inferiores a 5 m/s, há tendência para o fator corretivo tender para o infinito, i.e., o fator corretivo tende para valores consideráveis. Desta forma, afirma-se ser difícil corrigir precipitações onde prevalecem intensidades

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

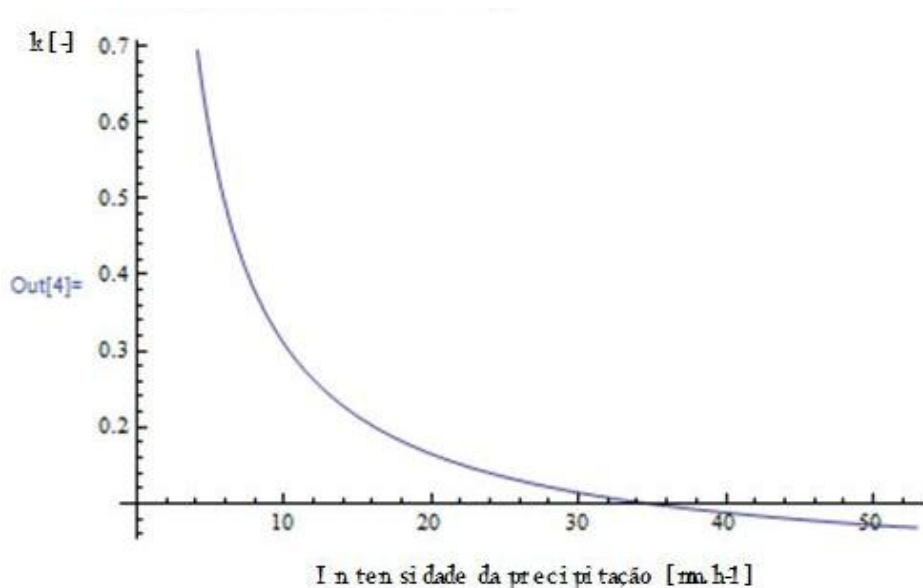
de vento baixas. No caso da presença de intensidades de vento baixas, e intensidade de precipitações elevadas, não se justifica a utilização do fator corretivo ( $k$ ), pois este acaba por atingir valores próximos a zero. Faz sentido visto que o fator corretivo tem em maior consideração, a ação do efeito do vento a atuar na recolha das amostras. Em casos em que ocorre um aumento da velocidade de vento e de precipitação (e.g. tempestades, intempéries) em simultâneo, verifica-se, através da mesma figura, que é necessário aplicar um aumento do fator corretivo ( $k$ ), pois aí estão associadas maiores erros ao registo / medição de precipitação.



**Figura 25.** Representação gráfica da relação intensidade da precipitação ( $I_p$ ), velocidade do vento ( $v$ ) e fator corretivo ( $k$ ) do Pico do Areeiro, utilizando o Wolfram Mathematica for students 7.1.

Na avaliação da Figura 26, referente ao Funchal, verifica-se que o fator corretivo diminui logaritmicamente, à medida que a intensidade da precipitação aumenta. Para intensidades de precipitação baixa, o fator corretivo a aplicar é muito grande, o que de certa forma vai a favor dos estudos efetuados por Yang *et al.* (1998), Yang *et al.* (2001), Hsu *et al.* (2005) e Sevruk (1996), ao afirmarem que para pequenas intensidades, o fator corretivo a aplicar nas amostras de precipitação é muito elevado porque estão implícitos maiores erros associados ao registo de precipitação. No caso da formulação da equação corretiva do Funchal, o fator corretivo ( $k$ ) de precipitação tem em consideração apenas a intensidade da precipitação e não, como fora descrito pela equação (1), como sendo um fator corretivo tendo em conta a ação do vento.

Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira  
Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal



**Figura 26.** Representação gráfica da relação intensidade da precipitação ( $I_p$ ) e fator corretivo da precipitação ( $k$ ) do Funchal, utilizando o *Wolfram Mathematica for students 7.1*.

Cada equação obtida é considerada como uma solução local e deverá ser aplicada com cautela a outros locais da ilha, pois a sua formulação foi determinada a partir de dados recolhidos nos locais em estudo e estiveram sujeitos a diferentes condições climáticas (ao longo da ilha existem diferentes microclimas com diferentes condições climáticas), diferentes predominâncias de rumos de vento e localização diferente (e.g. diferentes altitudes e ocupação do solo circundante).

Na procura de um modelo adequado aos dados registados pelo udógrafo, deparou-se com a fórmula de Yang *et al.* (1998: 243) que, através da sua análise para um equipamento sem escudo de proteção à ação do vento, deparou-se com uma equação do rácio de captação de precipitação (dependente da variável velocidade do vento ( $v_v$ )) com o respetivo valor do coeficiente de determinação simples ( $r^2$ ) igual a 0,27 (ver equação (3)). Ao adquirir um coeficiente de determinação de 0,27 significa que apenas 27% da amostra obtida pelo autor é compatível com o modelo, tornando-se assim, um modelo de correção de precipitação pouco viável ao nosso estudo.

Embora existissem na bibliografia outros modelos equacionais, referentes ao fator corretivo de precipitação ( $k$ ) para diferentes modelos de aparelhos registadores de precipitação, foi decidido não dar muita importância por estarem direcionados apenas para um determinado modelo de equipamento, diferente ao utilizado na elaboração deste estudo.

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

No entanto, para efeitos futuros de correção de precipitações do Pico do Areeiro e do Funchal será possível a utilização das equações (16) e (18) e assim determinar a verdadeira quantidade de precipitação que cai nesses locais.

### **IV.3.3. Análise ANOVA**

A análise ANOVA trata-se de um teste paramétrico com a capacidade de avaliar, simultaneamente, diferentes tipos de dados a partir da média e da dispersão desses mesmos dados, entre e nos grupos de amostras recolhidas (Hair *et al.*, 1998).

Com os dados recolhidos em intervalos de 10 minutos, decidiu-se elaborar uma análise estatística (ANOVA), para o Pico do Areeiro e o Funchal, de forma a tentar sustentar os modelos obtidos anteriormente. Essa avaliação é demonstrada nas tabelas seguintes.

Uma vez que os valores de significância  $p$  (sigla “sig.” nas tabelas) são iguais a zero para as diferentes regressões efetuadas, a análise estatística permite concluir que não existe igualdade de médias dentro do grupo de amostras para qualquer nível de significância. Tal afirma-se porque  $p < 0,05$  (Field, 2009: 376).

Na avaliação dos dados do Funchal, a intensidade de precipitação é a única variável com influência nos resultados do fator corretivo (razão  $F = 747,648$ ), enquanto no Pico do Areeiro, a combinação da intensidade da precipitação com a velocidade do vento, têm influência relevante nos resultados previstos do fator corretivo (razão  $F = 1206,043$ ).

**Tabela 7.** Análise ANOVA dos dados do Funchal, registados em intervalos de 10 minutos.

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	552,847	1	552,847	747,648	,000 <sup>b</sup>
	Residual	407,436	551	,739		
	Total	960,282	552			

a. Dependent Variable: lnK

b. Predictors: (Constant), lnIntesPrecIM

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

**Tabela 8.** Análise ANOVA dos dados do Pico do Areeiro, registados em intervalos de 10 minutos.

ANOVA <sup>a</sup>						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1762,995	1	1762,995	3396,135	,000 <sup>b</sup>
	Residual	1591,097	3065	,519		
	Total	3354,092	3066			
2	Regression	1807,718	2	903,859	1790,915	,000 <sup>c</sup>
	Residual	1546,374	3064	,505		
	Total	3354,092	3066			
3	Regression	1816,390	3	605,463	1206,043	,000 <sup>d</sup>
	Residual	1537,702	3063	,502		
	Total	3354,092	3066			

a. Dependent Variable: Lnk

b. Predictors: (Constant), LnIntIM

c. Predictors: (Constant), LnIntIM, VxLnIntIM

d. Predictors: (Constant), LnIntIM, VxLnIntIM, Vento

Pela observação da Figura 27 e 28, onde está demonstrada a relação entre a regressão padronizada dos valores previstos de k e a regressão normalizada dos valores residuais verifica-se que os dados, tanto para o Pico do Areeiro como para o Funchal, estão dispostos segundo um modelo não linear, com presença de alguns resíduos. São denominados por resíduos toda a relação entre os valores previstos de k e os valores normalizados dos valores residuais que ficam fora da “mancha” de dados representados. Estes resíduos podem aparentar ser alguns dos erros que poderiam estar “camuflados” no meio do registo de dados muito semelhante.

Apesar dos modelos serem não lineares, apenas a regressão do Funchal, representada pela Figura 28, possui os dados razoavelmente organizados, segundo os eixos. Tal poderá ser resultante da existência de uma variável dependente (fator corretivo k) em função de uma variável independente (intensidade da precipitação).

Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira  
Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal

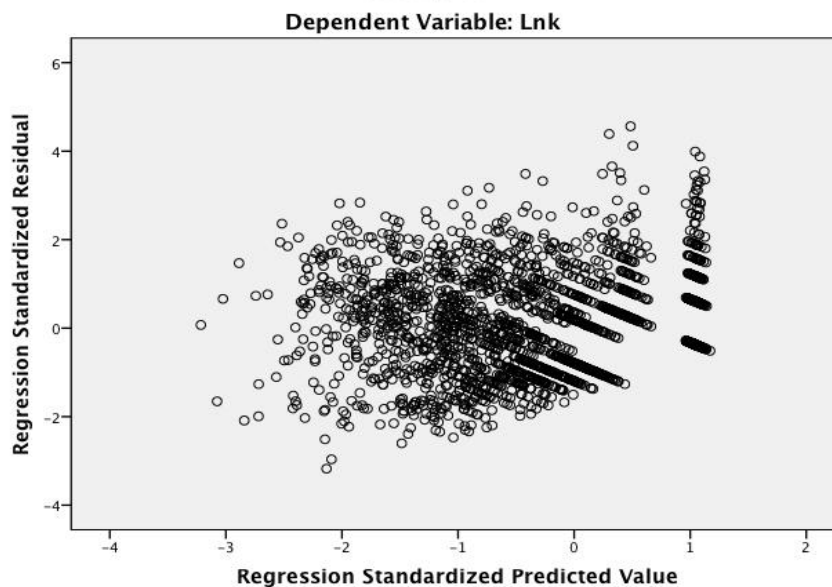


Figura 27. Regressão linear padronizada entre o valor previsto e residual do fator corretivo de precipitação (k) do Pico do Areeiro.

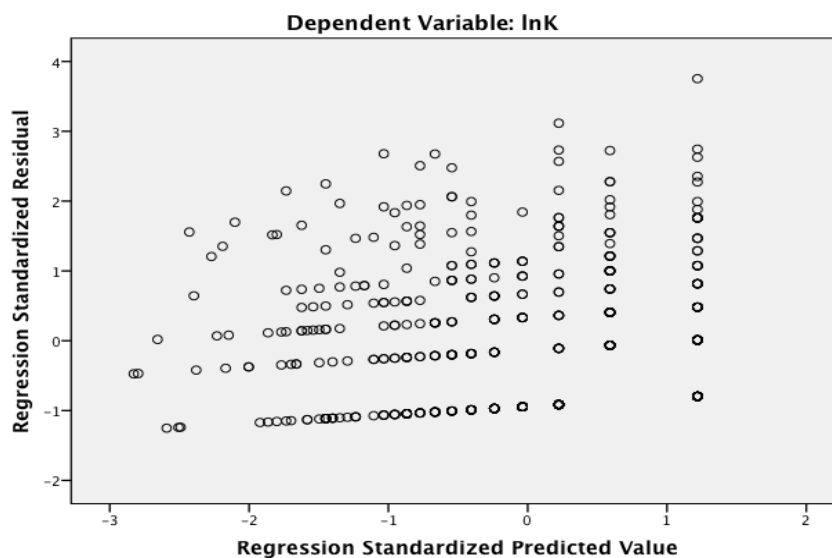


Figura 28. Regressão linear padronizada entre o valor previsto e residual do fator corretivo de precipitação (k) do Funchal.

Nos dados recolhidos foi observado a existência de grande disparidade de valores de precipitação recolhidos muito semelhantes, podendo ser resultante da presença de erros ao longo da série de precipitação, como fora anteriormente referido. Por isso, e de forma a encontrar possíveis soluções para aperfeiçoar os resultados obtidos, seria necessário aplicar outro modelo de equações, adicionando outros fatores que poderão influenciar na correção de precipitação (e.g. temperatura média

**Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**  
**Capítulo IV: Efeito do vento no registo da precipitação no Pico do Areeiro e no Funchal**

do ar ou o tamanho das gotas de chuva), de forma a reduzir possíveis erros existentes, ou então homogeneizar as características dos aparelhos registadores que se situavam no solo, como por exemplo a capacidade dos basculantes, de forma a obter uma comparação de registo de precipitação mais aceitável ou ainda, aplicar uma outra condição inicial no tratamento dos dados. No entanto, devido à natureza dos dados (por serem dados aleatórios dependentes das condições climatérica e outros fatores locais), as equações escolhidas foram as que melhor se ajustavam aos nossos dados.

## Capítulo V: Conclusões e perspectivas futuras

---

Com a realização deste trabalho verifica-se que, para além da consideração do modelo e características dos aparelhos de medição e de alguns possíveis erros sistemáticos locais que possam existir, o efeito do vento é um dos fatores a ter em consideração aquando na instalação local dos aparelhos registadores de precipitação e na correção dos dados de precipitação.

No geral, a partir da avaliação dos dados do Funchal e do Pico do Areeiro verifica-se que: o udógrafo colocado no solo regista maior número de eventos de precipitação superior enquanto o udógrafo do IPMA regista maior quantidade de precipitação, resultado que não era de esperar após o estudo bibliográfico, onde se afirma que o udógrafo do solo possui maior registo de precipitação do que o udógrafo a determinada altura.

Na comparação dos resultados obtidos conclui-se que, no Pico do Areeiro, embora ocorra uma pequena redução do registo de precipitação a determinada altura, o valor da precipitação aumenta, significativamente, com o aumento da velocidade do vento. Tal poderá estar associada, para além das causas anteriormente referidas, a eventos de precipitação intensa com grande velocidade de vento (e.g. intempérie, tempestades).

Como os locais em estudo possuem características climáticas, e localização diferentes foi necessário definir uma equação do fator corretivo de precipitação ( $k$ ) para cada local. As equações foram definidas tendo em consideração a medição da velocidade do vento, para o Pico do Areeiro a 10 m de altura e para o Funchal a 4,5 m de altura, e a intensidade de precipitação dos respetivos locais.

Na formulação da equação do fator corretivo de precipitação ( $k$ ) do Pico do Areeiro obteve-se que este depende da intensidade da precipitação e da velocidade do vento enquanto, a do Funchal está dependente apenas da intensidade da precipitação. A ausência da variável velocidade do vento na equação do fator corretivo do Funchal pode estar associada à influência da baixa altitude e da intensa urbanização existente nas mediações do local de recolha.

Na escolha do modelo de equação a ser realizada neste estudo, adotou-se como referência, a equação segundo Førland *et al.* (1996: 27), por causa da boa adaptação dos dados à equação ( $R^2=0,542$  e  $r^2=0,576$ ) e porque realmente, a intensidade da precipitação juntamente com a velocidade do vento são fatores que influenciam o registo de precipitação.

## **Estudo do Efeito do Vento na Quantificação da Precipitação na Ilha da Madeira**

### **Capítulo V: Conclusões e perspetivas futuras**

Na avaliação da relação gráfica entre a intensidade de precipitação, velocidade do vento e do fator de correção de precipitação ( $k$ ) do Funchal observa-se que, o fator corretivo diminui logaritmicamente, à medida que a intensidade da precipitação aumenta. Para intensidades de precipitação baixa, o fator corretivo a aplicar é muito grande.

Na avaliação da relação gráfica entre a intensidade de precipitação e do fator de correção de precipitação ( $k$ ) do Pico do Areeiro observa-se que, se a intensidade de precipitação tiver valor próximo a zero e, simultaneamente, a velocidade do vento for de valor inferior a 5 m/s, há tendência para o fator corretivo possuir valores muito grandes. No caso da presença de intensidades de vento baixas, e intensidade de precipitações elevadas, não se justifica a utilização do fator corretivo ( $k$ ). Em casos em que ocorre um aumento da velocidade de vento e de precipitação em simultâneo (e.g. tempestades, intempéries), verifica-se também a necessidade de aplicar um aumento do fator corretivo ( $k$ ).

Nos dados recolhidos foi observado a existência de grande disparidade para dados de precipitação muito semelhante e, uma solução para melhorar os resultados obtidos é aplicar outro modelo de equações, adicionando outros fatores que poderão influenciar na correção de precipitação, aplicar uma outra condição inicial no tratamento dos dados, ou ainda homogeneizar as características dos aparelhos do solo.

Para futuros estudos na ilha da Madeira nesta área, será previsto o melhoramento das instalações dos udógrafos ao nível do solo, no Pico do Areeiro e no Funchal, sendo previsto a elaboração de fossos ou enterrar os udógrafos, deixando-os apenas com a boca do aparelho de fora, como fora realizado pela WMO e por todo o mundo. Desta forma, será possível comprovar se existem diferenças com o atual estudo, no que se refere ao registo da precipitação e, conseqüentemente com a obtenção da equação do fator corretivo ( $k$ ), tanto para o Pico do Areeiro como para o Funchal.

Para uma obtenção mais generalizada e obter séries mais significativas pelo aumento da área de registo da precipitação, está previsto a colocação de mais do que um udógrafo em cada local. Futuramente, este estudo poderá ser alargado a outras localizações e, desta forma, generalizar a influência do efeito do vento no registo da precipitação na ilha da Madeira e desta forma, contribuir para um melhor desenvolvimento em áreas científicas, como a Hidrologia, Recursos Hídricos, Planeamento e Ordenamento do Território e Hidráulica, e na prestação de serviços à população regional.

## Referências bibliográficas

---

ALLERUP, P.; MADSEN, H. (1980), "Accuracy of Point precipitation measurements". *Nordic Hydrology*, No.2, pp. 57-70.

BRUM da SILVEIRA, A.; MADEIRA, J.; RAMALHO, R.; FONSECA, P.; PRADA, S. (2010). "Notícia Explicativa da Carta Geológica da Ilha da Madeira na escala 1:50.000, Folhas A e B", Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira.

CAPELO, J., SEQUEIRA, M., JARDIPMA, R., COSTA, J.C. (2004), "Guia da Excursão Geobotânica dos V Encontros ALFA 2004 à Ilha da Madeira" in CAPELO, J. (2004), "A paisagem vegetal da Ilha da Madeira", *Quercetea* 6, pp. 5-43.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista da (2006), "Capítulo 2 – Ciclo Hidrológico". Hidrologia.

COMISSÃO NACIONAL DO AMBIENTE (1984), "Precipitação: Quantidade total e Número de dias no ano (Precipitação igual ou superior a 1,0 mm) ". Atlas do Ambiente, Notícia Explicativa I.4.1 e I.4.2.

CHVÍLA, B.; SEVRUK, B.; ONDRÁS, M. (2005), "The wind-induced loss of thunderstorm precipitation measurements". *Atmospheric Research*, No. 77, pp. 29-38.

COSTA, A. (2009). "Stochastic space–time models for the characterization of precipitation extreme values - A contribution to the study of the desertification phenomenon". Dissertation submitted for the degree of Doctor of Engineering Sciences. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

DAHLSTRÖM, B. (1973), "Investigation of errors in rainfall observations". Department. of Meteorology of University of Uppsala, Report No. 34, pp.31.

DEVINE, K. A.; MEKIS, E. (2008), "Field Accuracy of Canadian Rain Measurements". *Atmosphere - Ocean*, Volume 46 (2), pp. 213-227.

FERNANDES, A. L. (2007), "Contribuição para o conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da ilha da Madeira". Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre. Funchal: Universidade da Madeira.

FERREIRA, H. A. (1955), "O Clima de Portugal. VIII: Açores e Madeira". Lisboa: INMG.

FIELD, A. (2009), *Descobrendo a Estatística usando o SPSS*. São Paulo: Editora Artmed, 2ª Edição.

FIGUEIRA, C. (2009), “Estudo da Precipitação Oculta nas Florestas Naturais do Norte do Paul da Serra, Ilha da Madeira”. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Ecologia da Paisagem e Conservação da Natureza. Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

FØRLAND, E.J.; ALLERUP, P.; DAHLSTRÖM, B.; ELOMAA, E.; JÓNSSON, T.; MADSEN, H.; PERÄLÄ, J.; RISSANEN, P.; VEDIN, H.; VEJEN, F. (1996), “Manual for Operational Correction of Nordic Precipitation Data”. *Norwegian Meteorological Institute*, Report 24/96.

GOODISON, B.; LOUIE, P.; YANG, D. (1998), “WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison – Final Report”. *World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods*, Report No. 67.

GUJARATI, D.; PORTER, D. (2006), *Econometria Básica*. São Paulo: Editora AMGH Quinta Edição.

HABIB, E.; KRAJEWSKI, W. F.; NEŠPOR, V.; KRUGER, A. (1999), “Numerical simulation studies of rain gage data correction due to wind effect”. *Journal of Geophysical Research*, Volume 104, No.D16, pp.19, 723-19,733.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. (2009), *Análise Multivariada de dados*. São Paulo: Editor Bookman, 6ª Edição.

HSU, S.; GUO, Y. (2005), “Effect of Wind Speed in the Measurement of Rainfall”. *Crop, Environment & Bioinformatics*, pp.81-86.

LANZA, L.; VUERICH, E. (2005), “The WMO Field Intercomparison of Rain Intensity Gauges”. *Atmospheric Research*, pp.534-543.

LENCASTRE, A; FRANCO, F.M. (2006), *Lições de Hidrologia*. Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.

MARQUES, J.; SOUSA, J. (2009). *Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

NEŠPOR, V. (1995), “Investigation of Wind-induced error of precipitation measurements using a three-dimensional numerical simulation”. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich for the degree of Doctor of Natural Science.

NEŠPOR, V.; SEVRUK, B. (1999), "Estimation of wind-Induced Error of Rainfall Gauge Measurements Using a Numerical Simulation". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 16, pp. 450-464.

POLLOCK, Michael (2010), "Assessing New Rainfall Estimation against Traditional Measurement Methods". BEng Civil Engineering, Newcastle University.

PRADA, S. (2000), "Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira", Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Funchal: Universidade da Madeira.

PRADA, S.; GASPAR, M.; SILVA, M.; CRUZ, J.; PORTELA, M.; HORA, G. (2003), "Recursos Hídricos da Ilha da Madeira". *Comunicações do Instituto Geológico e mineiro*, Tomo 90, pp. 125-142.

PRADA, S.; PERESTRELO, M.; SEQUEIRA, M.; NUNES, A.; FIGUEIRA, C.; CRUZ, J. (2005), "Disponibilidades Hídricas da Ilha da Madeira", *In AQUAMAC – Técnicas y métodos para la gestion sostenible del agua en la Marañonesia*. Edição do Instituto Tecnológico de Canárias, Cabildo de Lanzarote e Consejo Insular de Aguas de Lanzarote, p. 261-294.

QUINTELA, A. (1996). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

SAMUELSON, P.; NORDHAUS, W. (2010). *Economia*. São Paulo: The McGraw - Hill. 19ª Edição.

SANTOS, D.; AGUIAR, R. (editores) (2006), "Impactos e Medidas de Adaptação às Alterações Climáticas no Arquipélago da Madeira - Projeto CLIPMAAAT II". Funchal: Direção Regional do Ambiente da Madeira.

SEPÚLVEDA, S. (2011), "Avaliação da Precipitação Extrema da Ilha da Madeira", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

SEVRUK, B. (1996), "Adjustment of tipping-bucket precipitation gauge measurements". *Atmospheric Research* 42, pp. 237-246.

SEVRUK, B.; ONDRÁS, M.; CHVÍLA, B. (2009), "The WMO precipitation measurements intercomparisons". *Journal of Atmospheric Research*, Volume 92, pp.376-380.

SILVA, M. (2006), "Meteorologia e Climatologia". Recife: Versão Digital 2.

SOLANTIE, R. (1985), "A quantitative model for operational point precipitation correction by use of data from standard meteorological stations". *In Workshop on the Correction of Precipitation Measurements*, Zurich, pp. 197-202.

SUGIURA, K.; OHATA, T.; YANG, D. (2006), "Catch Characteristics of Precipitation Gauges in High-Latitudes Regions with High Winds". *Journal of Hydrometeorology*, Volume 7, pp. 984-994.

TOMÉ, R. (2007), "Distribuição de precipitação e vento na ilha da Madeira: um estudo comparativo com vários modelos de alta resolução". Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra, Lisboa: Universidade de Lisboa.

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2010), "Apostila de Hidrologia Aplicada", Apostila destinada aos alunos do curso de Engenharia de Produção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, da disciplina de Hidrologia Aplicada, ministrada pela profª Celimar Azambuja Teixeira. Brasil.

WAGNER, A. (2009), "*Literature Study on the Correction of Precipitation Measurements*, FutMon C1-Met-29(BY)". Bavarian State Institute of Forestry, Germany.

WMO (1984), "International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge (B. Sevruk and W.R. Hamon)". *Instruments and Observing Methods Report No. 17*, WMO/TD No. 38, Geneva.

WMO (2008a), *Guide to Hydrological Practice: Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*. WMO-No. 168.

WMO (2008b), *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO- No. 8.

YANG, D.; GOODISON, B.E.; ISHIDA, S.; BENSON, C.S. (1998), "Adjustment of daily precipitation data at 10 climate stations in Alaska: Application of World Meteorological Organization intercomparison results". *Water Resources Research*, Vol. 34, No.2, pp.241-256.

YANG, D.; OHATA, T. (2001), "A Bias-Corrected Siberian Regional Precipitation Climatology". *Journal of Hydrometeorology*, volume 2.

## ENDEREÇOS ELETRÓNICOS

“Atlas Climático dos Arquipélagos das Canárias, da Madeira e dos Açores”, Documento consultado a 7 de março de 2013 em <[http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/2Atlas\\_clIPMAatologi co/Atlas\\_CIIIPMAa\\_Macaronesia\\_Baja.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/2Atlas_clIPMAatologi co/Atlas_CIIIPMAa_Macaronesia_Baja.pdf)>.

BRITO, Raquel Soeiro de (2005), Atlas de Portugal. Instituto Geográfico Português, Documento Consultado a 3 de abril de 2013 em <<http://62.48.187.114/snig-educ/atlas/atlas-1.pdf>>.

Davis (2013), “Rain Collector II”. Documento consultado a 15 de dezembro de 2013 em <[http://www.davisnet.com/product\\_documents/weather/manuals/07395-224\\_IM\\_7852.pdf](http://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-224_IM_7852.pdf)>.

JERVELL, J. (2008), “Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores”, Relatório do Projecto Final, Documento consultado a 20 de setembro de 2013 em <<http://paginas.fe.up.pt/~em02090/Documentos/final2.pdf>>.

Lambrecht (2013), “Rain Gauge according to Hellmann”, Documento consultado a 7 de Janeiro de 2014 em <<http://www.lambrecht.net>>.

NOAA (2006), “8-inch Rain Gauge”. Documento consultado a 16 de agosto de 2013 em <[http://www.crh.noaa.gov/lbf/?n=8-inch\\_rain\\_gauge](http://www.crh.noaa.gov/lbf/?n=8-inch_rain_gauge)>.

Plano Regional da Água da Madeira – Relatório Técnico: Versão para consulta Pública (2003), Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, Documento consultado a 7 de agosto de 2012 em <<http://pt.scribd.com/doc/23635490/PRAM-RelatorioTecnico>>.

QUINTAL, R. (2012), “Aluviões da Madeira – Ler o passado, Compreender o Presente, Prevenir o Futuro”, Página consultada a 27 de março de 2013 em <<http://www.aspea.org/19CeRaIPMAundoQuintal.pdf>>.

USGS (2013), “O Ciclo da Água”, Página consultada a 17 de abril de 2013 em <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>.

# ANEXO A: Especificações dos equipamentos de medição de precipitação

---

## Specifications

### General

Sensor Type	Tipping bucket with magnetic reed switch
Output	Contact closure
Attached Cable Length	40' (12 m)
Cable Type	4-conductor, 26 AWG
Connector	Modular connector (RJ-11)
Recommended Maximum Cable Length	900' (270 m)
Housing Material	UV-stabilized ABS plastic
Dimensions	
Rain Collector	8.75" diameter x 9.5" high (16.5 cm diameter x 24 cm high)
Collection Area	33.2 in <sup>2</sup> (214 cm <sup>2</sup> )
Weight	2 lbs. 3 oz. (1 kg)

### Console Data

These specifications apply to sensor output as converted by Davis Instruments weather station consoles.

#### Range

Daily Rainfall	0.00" to 99.99" (0.0 mm to 999.8 mm)
Total Rainfall	0.00" to 99.99" (0.0 mm to 9999 mm)

#### Accuracy

Rainfall	±3%, ±1 rainfall count between 0.01" and 2.00" per hour (0.2 mm and 50.0 mm per hour); ±5%, ±1 rainfall count between 2.00" and 4.00" per hour (50.0 mm and 100.0 mm per hour)
Resolution	0.01" (0.2 mm)
Sample and Display Update Interval	16 seconds (max)

### WeatherLink® Data

These specifications apply to sensor output as logged and displayed by the WeatherLink.

Daily Rainfall	Total during archive interval
Total Rainfall	Total during archive interval
Rate of Rainfall	Maximum value during archive interval (For Vantage Pro and Pro2 models only)

### Input/Output Connections

Red	Switch terminal
Green & Yellow	Switch terminal

Figura 29. Especificações do udógrafo *Rain Collector II* (Davis, 2013)



# RAIN GAUGE

according to Hellmann

The rain classic...

and evergreen. Plain and rigorously useful technologies guarantee high quality. Construction according to the requirements of the German meteorological service (DIN 58666). The polystyrene measuring cylinder is equipped with a scale with very good reading accuracy.

- measurement according to DIN-norm
- easy to mount
- simple usage and handling
- weather-proof materials
- very robust and compact
- good value
- b-variety with twice as much equipment for snow measurement

classical meteorology · sewage plants · water management and agriculture · structural and civil engineering · forestry



Standard Line	(1600)	Rain Gauge according to Hellmann	Id-No. 00.16000.000 000
Measuring element:		collecting funnel with collecting can	
Measuring ranges:		1.2 l collecting can: precipitation quantity 60 mm 200 cm <sup>3</sup> measuring cylinder: 10 mm	
Collecting surface:		200 cm <sup>2</sup> WMO standard	
Range of application:		operating temperatures 0...+60 °C	
Scale:		0.1 mm/ 0...10 mm	
Maximum Permissible Error:		0.1 mm precipitation	
Housing/ Design:		Zinc plate - RAL 7038 (agate-grey) - acc. to DWD/DIN 58666	
Collecting can/ Cylinder:		plastics/ polystyrene acc. to DIN 58667	
Dimensions/ Weight:		H 450 mm · Ø 190 mm · approx 2.3 kg	
<u>Version:</u>			
00.16002.000 000	(1600 b)	Rain and Snow Gauge according to Hellmann With 2 collecting cans · 2 collecting funnels · 2 bottom parts · 2 snow crosses · 200 cm <sup>3</sup> measuring cylinder: 10 mm · weight approx. 5.2 kg	
<u>Accessories:</u>			
32.16000.006 000	(1600 U6)	Support - necessary for assembly of (1600) · galvanized flat steel · H 375 mm · weight approx. 0.7 kg	
32.16000.030 000	(1600 U30)	Snow cross · weight approx. 0.5 kg	
33.16000.031 000	(1600-31)	Spare measuring cylinder · polystyrene acc. to DIN 58667 · weight 0.05 kg	

**LAMBRECHT**  
METEOROLOGICAL INSTRUMENTS · GERMANY

Tel +49 (0) 531-49581-0  
E-mail info@lambrecht.net

www.lambrecht.net

13.13

Figura 30. Especificações do udógrafo do IPMA (Lambrecht, 2013)

## ANEXO B: Avaliação SPSS dos dados do Pico do Areeiro

**Tabela 9.** Cálculo dos coeficientes da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Pico do Areeiro.

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,612	,015		40,270	,000
	LnIntIM	-,626	,011	-,725	-58,276	,000
2	(Constant)	,609	,015		40,635	,000
	LnIntIM	-,872	,028	-1,011	-30,868	,000
	VxLnIntIM	,019	,002	,308	9,414	,000
3	(Constant)	,467	,037		12,573	,000
	LnIntIM	-,833	,030	-,965	-27,987	,000
	VxLnIntIM	,015	,002	,238	6,489	,000
	Vento	,014	,003	,060	4,156	,000

a. Dependent Variable: Lnk

**Tabela 10.** Cálculo dos coeficientes de determinação da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Pico do Areeiro.

**Model Summary<sup>d</sup>**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,725 <sup>a</sup>	,526	,525	,72050
2	,734 <sup>b</sup>	,539	,539	,71042
3	,736 <sup>c</sup>	,542	,541	,70854

a. Predictors: (Constant), LnIntIM

b. Predictors: (Constant), LnIntIM, VxLnIntIM

c. Predictors: (Constant), LnIntIM, VxLnIntIM, Vento

d. Dependent Variable: Lnk

## ANEXO C: Avaliação SPSS dos dados do Funchal

**Tabela 11.** Cálculo dos coeficientes da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Funchal.

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,914	,046		19,938	,000
	InIntesPreCIM	-,907	,033	-,759	-27,343	,000

a. Dependent Variable: lnK

**Tabela 12.** Cálculo dos coeficientes de determinação da equação modelo referente ao fator corretivo estimativo do Funchal.

**Model Summary<sup>b</sup>**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,759 <sup>a</sup>	,576	,575	,85991

a. Predictors: (Constant), InIntesPreCIM

b. Dependent Variable: lnK

