

# Utilidade e Forma de Tratamento dos Dados dos Udógrafos na Monitorização de Ribeiras para a Prevenção do Risco de Aluviões

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Jorge Gregório Moniz Ramos**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

# **Utilidade e Forma de Tratamento dos Dados dos Udógrafos na Monitorização de Ribeiras para a Prevenção do Risco de Aluviões**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Jorge Gregório Moniz Ramos**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR

Paulo Miguel de Macedo França

CO-ORIENTADORA

Lisandra de Fátima Cró Camacho

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento, a todos os que me elucidaram e contribuíram em todos os momentos para que este trabalho fosse possível e sobretudo ao orientador, Professor Doutor Paulo França, por toda a sua ajuda, disponibilidade e pela transmissão dos seus conhecimentos.

À Coorientadora, Engenheira Lisandra Camacho, obrigado pela sua ajuda, disponibilidade, pelos seus ensinamentos e pela sua amizade.

À Universidade da Madeira, especial obrigado aos docentes do curso de engenharia civil, pela minha formação superior.

Ao Laboratório Regional de Engenharia Civil da Madeira, muito obrigado pela disponibilização de todos os recursos necessários para que este trabalho fosse possível.

E por último, mas não menos importante quero agradecer à minha família, por todo o seu apoio.



## RESUMO

O presente trabalho acadêmico focou-se em dois grandes objetivos. Por um lado focou-se na investigação do funcionamento dos udógrafos como equipamentos de monitorização de precipitação bem como o contributo indispensável que os mesmos proporcionam, em conjunto com outros equipamentos e outras ferramentas, como dispositivo de alerta para uma eventual ocorrência de aluvião. Por outro lado, focou-se no tratamento e análise dos dados monitorizados pelos mesmos equipamentos.

A investigação dos equipamentos baseou-se no estudo de diferentes soluções de equipamentos, analisando as suas vantagens e desvantagens. Foi descrito a forma de funcionamento de alguns modelos de udógrafos e sucintamente o funcionamento dos satélites e dos radares meteorológicos, revelando-se estes últimos, como os mais eficientes para a prevenção de aluviões. O estudo dos equipamentos deu maior destaque ao funcionamento dos udógrafos de recetáculo basculante.

O tratamento dos dados udográficos efetuado neste trabalho baseou-se na criação de folhas de cálculo em Excel para a organização, tratamento e análise das séries de dados. Inicialmente estava previsto o tratamento de dados de nove postos udográficos pertencentes à rede udográfica do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), contudo posteriormente um dos postos foi excluído devido à elevada percentagem de lacunas que continha.

Após a organização dos dados, procedeu-se à colmatação das lacunas existentes nas séries e posteriormente à análise da qualidade das mesmas séries de dados. Finalmente foram analisadas as séries de dados recorrendo a gráficos e ao Software ArcGIS for Desktop versão 10.4 da Environmental Systems Research Institute (ESRI).

Palavras-Chaves: Precipitação; Série de dados; Udógrafo; Udógrafo de recetáculo basculante; Precipitação diária máxima anual.



## **ABSTRACT**

This academic work has focused on two main objectives. On the one hand, focused on the investigation of the operation of udógrafos as precipitation monitoring equipment and the essential contribution that they provide in conjunction with other equipment and other tools, as a warning device for a possible occurrence of flash floods. On the other hand, focused on the treatment and analysis of data monitored by the same equipment.

The research of the equipment was based on the study of different equipment solutions, discuss their advantages and disadvantages. It has been described the operating mode of some diferentes rain gauges models. It was also described briefly the operation of weather satellites and radar, revealing the latter as the most efficient for the prevention of flash floods. The equipment of the study gave greater prominence to the functioning was tipping bucket rain gauge.

Treatment of rain gauge data carried out in this work was based on the creation of Excel spreadsheets for organizing, processing and analysis of the data series. Initially was planned to analyse nine data series of nine rain gauges stations belonging to the rain gauge network of Regional Civil Engineering Laboratory (LREC), but then one of the stations was excluded due to high percentage of gaps contained.

After the organization of the data, it proceeded to filling gaps in the series and after the analysis of the quality of the same data series. Finally we analyzed the data series using graphics, and ArcGIS for Desktop software version 10.4 of the Environmental Systems Research Institute (ESRI).

**Keywords:** Precipitation; Time series; Rain gauge; Tipping bucket rain gauge; Annual maximum daily rainfall.





# ÍNDICE DE TEXTO

|   |          |
|---|----------|
| Agradecimentos.....   | v        |
| Resumo.....   | vii      |
| Abstract .....  | ix       |
| Índice de texto .....   | xi       |
| Índice de figuras .....   | xvii     |
| Índice de tabelas .....   | xxiii    |
| Simbologia .....  | xxvii    |
| Lista de siglas .....   | xxxix    |
| <br>  |          |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1. Enquadramento do tema.....   | 1        |
| 1.2. Revisão histórica das aluviões ocorridas na ilha da madeira .....                  | 2        |
| 1.3. Objetivos do trabalho .....  | 3        |
| 1.4. Organização da dissertação .....   | 4        |
| <br>  |          |
| <b>2. CONCEITOS RELACIONADOS COM ALUVIÕES EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO .</b> | <b>5</b> |
| 2.1. Variação e distribuição da precipitação na ilha da Madeira.....                    | 10       |
| 2.1.1. Precipitações intensas.....  | 12       |
| 2.1.2. Recordes mundiais e portugueses de precipitação .....                            | 14       |
| 2.2. Relevo da ilha da Madeira.....   | 15       |
| 2.3. Bacia hidrográfica .....   | 16       |
| 2.3.1. Características morfológicas de uma bacia .....                                  | 17       |
| 2.3.1.1. Área de drenagem e perímetro .....   | 17       |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.3.1.2. | Forma.....  | 17 |
| 2.3.1.3. | Índice de compacidade .....                       | 18 |
| 2.3.1.4. | Índice de alongamento.....                        | 18 |
| 2.3.1.5. | Fator de Forma.....                               | 20 |
| 2.3.2.   | Caraterísticas do relevo .....                    | 20 |
| 2.3.2.1. | Curva hipsométrica.....                           | 20 |
| 2.3.2.2. | Altitude média .....                              | 23 |
| 2.3.2.3. | Altura média .....                                | 24 |
| 2.3.2.4. | Perfil longitudinal do curso de água .....        | 24 |
| 2.3.2.5. | Declive médio do curso de água principal.....     | 25 |
| 2.4.     | Limiares de precipitação.....                     | 26 |
| 2.4.1.   | Limiares de precipitação físicos .....            | 27 |
| 2.4.2.   | Limiares de precipitação empíricos .....          | 28 |
| 2.5.     | Equipamentos de medição de precipitação.....      | 29 |
| 2.5.1.   | Udómetro .....                                    | 31 |
| 2.5.2.   | Udógrafos .....                                   | 33 |
| 2.5.2.1. | Udógrafo de recetáculo basculante.....            | 33 |
| 2.5.2.2. | Udógrafo de sifão .....                           | 37 |
| 2.5.2.3. | Udógrafo de balança.....                          | 37 |
| 2.5.3.   | Sensores de medição de precipitação a laser ..... | 38 |
| 2.5.4.   | Satélites meteorológicos .....                    | 39 |
| 2.5.5.   | Radares meteorológicos.....                       | 40 |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.6.      | Utilidade dos udógrafos na prevenção do risco de aluvião .....         | 42        |
| 2.7.      | Erros de medição de precipitação.....                                  | 43        |
| 2.8.      | Correções dos erros associados aos udógrafos de recetáculos .....      | 45        |
| 2.9.      | Consistência e homogeneidade dos dados .....                           | 47        |
| 2.9.1.    | Consistência .....   | 47        |
| 2.9.2.    | Homogeneidade.....   | 48        |
| 2.9.3.    | Método utilizado para análise de consistência e homogeneidade .....    | 48        |
| 2.9.4.    | Método duplamente acumulado .....                                      | 48        |
| 2.10.     | Métodos utilizados para o preenchimento de lacunas .....               | 49        |
| 2.10.1.   | Método da média aritmética .....                                       | 50        |
| 2.10.2.   | Método de U. S. Weather Bureau.....                                    | 50        |
| 2.10.3.   | Método inverso da distância.....                                       | 51        |
| 2.10.4.   | Método da regressão linear.....  | 51        |
| 2.11.     | Dimensionamento de uma rede de udógrafos .....                         | 52        |
| 2.11.1.   | Recomendações para a escolha do local de colocação dos udógrafos ..... | 53        |
| <b>3.</b> | <b>TRATAMENTO DE DADOS.....</b>  | <b>55</b> |
| 3.1.      | Constituição da amostra .....  | 55        |
| 3.2.      | Área de estudo.....  | 57        |
| 3.3.      | Análise preliminar das séries de dados de precipitação .....           | 58        |
| 3.4.      | Preenchimento de lacunas dos postos udográficos em estudo .....        | 62        |
| 3.5.      | Análise de qualidade dos dados dos postos em estudo .....              | 64        |
| 3.6.      | Análise estatística.....   | 67        |
| 3.6.1.    | Medidas de tendência central .....                                     | 67        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.6.2.    | Medidas de dispersão.....  | 68        |
| 3.6.3.    | Medidas de assimetria .....  | 69        |
| 3.6.4.    | Resultados obtidos da análise estatística .....                              | 70        |
| 3.7.      | Probabilidade de não excedência (fórmula de Weibull).....                    | 71        |
| 3.8.      | Período de retorno .....   | 72        |
| 3.9.      | Tempo de concentração .....  | 73        |
| 3.9.1.    | Fórmula de Giandotti.....  | 74        |
| 3.9.2.    | Fórmula de Temez .....   | 74        |
| 3.9.3.    | Fórmula de Ven Te Chow .....   | 75        |
| 3.10.     | Tempo de resposta.....   | 76        |
| <b>4.</b> | <b>ANÁLISE DE DADOS.....</b>   | <b>77</b> |
| 4.1.      | Cálculo da precipitação sobre uma dada área.....                             | 77        |
| 4.1.1.    | Método da média aritmética .....   | 77        |
| 4.1.2.    | Método de Thiessen ou das áreas de influência.....                           | 77        |
| 4.1.3.    | Método das isoietas .....  | 79        |
| 4.1.4.    | Método da ponderação pelo inverso da distância .....                         | 80        |
| 4.1.5.    | Método de Kriging.....   | 81        |
| 4.2.      | Análise da precipitação do dia 20 de fevereiro de 2010.....                  | 83        |
| 4.3.      | Análise da precipitação diária máxima anual .....                            | 85        |
| 4.3.1.    | Análise a precipitação acumulada em 30 dias antecedentes à Pdma máxima ..... | 87        |
| 4.3.2.    | Análise da precipitação máxima acumulada em 10 dias .....                    | 89        |
| 4.3.3.    | Análise da precipitação para a P(dma máxima).....                            | 91        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 4.4.      | Análise da precipitação mensal .....  | 94         |
| 4.5.      | Análise da precipitação anual.....  | 96         |
| 4.6.      | Variação da precipitação média anual com a altitude .....   | 98         |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>99</b>  |
| 5.1.      | Conclusões .....  | 99         |
| 5.2.      | Trabalhos futuros .....   | 101        |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>103</b> |
|           | <b>ANEXOS.....</b>  | <b>109</b> |
|           | Anexo A1 – Características dos postos udográficos .....   | 109        |
|           | Anexo A2 – Dados para construção das curvas hipsométricas .....   | 119        |
|           | Anexo A3 – Dados para construção dos perfis longitudinais.....  | 121        |
|           | Anexo A4 – Dados para realização do método duplamente acumulado .....   | 123        |
|           | Anexo A5 – Dados para determinação das probabilidades de não excedência do ano hidrológico 2009/2010.....           | 127        |
|           | Anexo A6 – Dados para a determinação da probabilidade de não excedência para precipitação diária máxima anual ..... | 129        |
|           | Anexo A7 – Variação espacial da precipitação média mensal .....   | 131        |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 – Aumento do número de aluviões ocorridas/registadas na ilha da Madeira desde o século XVII. Adaptado de [4]. ..... | 2  |
| Figura 1.2 – Número de aluviões em cada mês, nos séculos XIX, XX e XXI. Adaptado de [4]. .....                                 | 3  |
| Figura 2.1 – Esquema longitudinal de um movimento de massa. Adaptado de [9]. .....   | 6  |
| Figura 2.2 – Variação temporal da precipitação na ilha da Madeira. Adaptado de [18]. .....                                     | 10 |
| Figura 2.3 – Variação da precipitação com a altitude na ilha da Madeira, adotado de [18]. .....                                | 12 |
| Figura 2.4 – Comparação dos recordes de precipitação mundiais e portugueses [21]. .....  | 14 |
| Figura 2.5 – Relevo da ilha da Madeira. ....   | 16 |
| Figura 2.6 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de João Gomes. ....   | 21 |
| Figura 2.7 – Carta hipsométrica da Ribeira de João Gomes obtida a partir do software ArcGIS 10.4. ....                         | 21 |
| Figura 2.8 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Santa Luzia. ....  | 22 |
| Figura 2.9 – Carta hipsométrica da Ribeira de Santa Luzia obtida a partir do software ArcGIS 10.4.. ....                       | 22 |
| Figura 2.10 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de São João. ....  | 22 |
| Figura 2.11 – Carta hipsométrica da Ribeira de São João obtida a partir do software ArcGIS 10.4. ....                          | 23 |
| Figura 2.12 – Perfil longitudinal da Ribeira de João Gomes. ....   | 25 |
| Figura 2.13 – Perfil longitudinal da Ribeira de Santa Luzia. ....  | 25 |
| Figura 2.14 – Perfil longitudinal da Ribeira de São João. ....   | 25 |
| Figura 2.15 – Esquema de limiar de precipitação para movimentos de vertentes. ....   | 26 |
| Figura 2.16 – Esquema de um Udómetro [29]. ....  | 32 |
| Figura 2.17 – Esquema de funcionamento de um udógrafo de recetáculos basculantes [16]. ....                                    | 34 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.18 – Udógrafo de recipientes basculante, modelo ARG100 da EML. ....   | 36 |
| Figura 2.19 – Udógrafo de recipientes basculantes modelo Rain-O-Matic da Pronamic. ....                                    | 36 |
| Figura 2.20 – Esquema e legenda de um udógrafo de sifão. Adaptado de [33]. ....  | 37 |
| Figura 2.21 – Udograma de um udógrafo de sifão [34]. ....  | 37 |
| Figura 2.22 – Sensor de medição de precipitação a laser. Adotado de [36]. ....   | 39 |
| Figura 2.23 – Esquema do feixe de luz infravermelho do sensor de medição de precipitação a laser. Adotado de [36]. ....    | 39 |
| Figura 2.24 – Exemplo de uma imagem de satélite em infravermelho, sobre os Arquipélagos dos Açores e da Madeira [39]. .... | 40 |
| Figura 2.25 – Exemplo de uma imagem de satélite em Visível sobre o Oceano Atlântico [40]. ....                             | 40 |
| Figura 2.26 – Exemplo de uma imagem de um radar meteorológico [41]. ....   | 42 |
| Figura 2.27 – Radar meteorológico de Arouca [42]. ....   | 42 |
| Figura 2.28 – Efeito do vento em diferentes tipos de udógrafos [43]. ....  | 45 |
| Figura 2.29 – Distância recomendada pela WMO entre udógrafos e obstáculos [37]. ....                                       | 54 |
| Figura 3.1 – Localização dos postos udográficos e respectivas bacias hidrográficas. ....                                   | 58 |
| Figura 3.2 – Exemplo da folha de cálculo para organização dos dados de precipitação. ....                                  | 59 |
| Figura 3.3 – Folha de cálculo com os valores de P (dia) disposto em tabela. ....   | 60 |
| Figura 3.4 – Máxima precipitação acumulada para diferentes conjuntos de dias. ....   | 61 |
| Figura 3.5 – Análise de qualidade do posto Achada Grande pelo método duplamente acumulado. ....                            | 65 |
| Figura 3.6 – Análise de qualidade do posto Camacha, pelo método duplamente acumulado. ....                                 | 65 |
| Figura 3.7 – Análise de qualidade do posto Casa do Barreiro pelo método duplamente acumulado. ....                         | 65 |
| Figura 3.8 – Análise de qualidade do posto Casa Velha método duplamente acumulado. ....                                    | 65 |
| Figura 3.9 – Análise de qualidade do posto Chão das Feiteiras pelo método duplamente acumulado. ....                       | 65 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 3.10 – Análise de qualidade do posto Curral das Freiras pelo método duplamente acumulado.   | 65 |
| Figura 3.11 – Análise de qualidade do posto Fajã da Nogueira pelo método duplamente acumulado.   | 66 |
| Figura 3.12 – Análise de qualidade do posto Trapiche pelo método duplamente acumulado. ....  | 66 |
| Figura 4.1 – Áreas de influência segundo o método de Thiessen. ....  | 78 |
| Figura 4.2 – Esquema de isoietas para determinação da precipitação ponderada sobre uma região. ...   | 80 |
| Figura 4.3 – Esquema de um variograma. ....  | 82 |
| Figura 4.4 – Variação espacial da precipitação média anual sobre as três bacias hidrográficas em estudo. ....  | 83 |
| Figura 4.5 – Análise da precipitação ocorrida no dia 20 de fevereiro de 2010, da precipitação ocorrida no mês de fevereiro de 2010 e da precipitação ocorrida no ano hidrológico 2009/2010. .... | 84 |
| Figura 4.6 – Variação horária da precipitação no dia 20 de fevereiro de 2010, em cada um dos postos. ....  | 85 |
| Figura 4.7 – Variação da P(dma). ....  | 85 |
| Figura 4.8 – Variação da P(dma). ....  | 85 |
| Figura 4.9 – Variação da P(dma). ....  | 86 |
| Figura 4.10 – Variação da P(dma) ....  | 86 |
| Figura 4.11 – Variação da P(dma). ....   | 86 |
| Figura 4.12 – Variação da P(dma) no. ....  | 86 |
| Figura 4.13 – Variação da P(dma). ....   | 86 |
| Figura 4.14 – Variação da P(dma). ....   | 86 |
| Figura 4.15 – P(dma) dia 02 de fevereiro de 2010. ....   | 87 |
| Figura 4.16 – P(dma) dia 20 de fevereiro de 2010. ....   | 87 |
| Figura 4.17 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010. ....   | 88 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.18 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010. ....                               | 88 |
| Figura 4.19 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010. ....                               | 88 |
| Figura 4.20 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010. ....                               | 88 |
| Figura 4.21 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010. ....                               | 88 |
| Figura 4.22 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010. ....                               | 89 |
| Figura 4.23 – Precipitação acumulada dos 20 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010. ....                               | 89 |
| Figura 4.24 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 03 de março de 2013 (dia em que ocorreu P(dma máxima). .... | 89 |
| Figura 4.25 – Variação horária da precipitação do dia 02 de fevereiro. ....  | 91 |
| Figura 4.26 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 02 de fevereiro de 2010. ....                          | 91 |
| Figura 4.27 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 02 de fevereiro de 2010. ....                          | 92 |
| Figura 4.28 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos, dia 20 de fevereiro de 2010. ....                            | 92 |
| Figura 4.29 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 20 de fevereiro de 2010. ....                          | 93 |
| Figura 4.30 – Variação da precipitação horária do dia 20 de fevereiro de 2010. ....  | 93 |
| Figura 4.31 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 20 de fevereiro de 2010. ....                          | 93 |
| Figura 4.32 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 03 de março de 2013. ....                              | 94 |
| Figura 4.33 – Variabilidade mensal da precipitação. ....   | 94 |
| Figura 4.34 – Variabilidade mensal da precipitação. ....   | 94 |
| Figura 4.35 – Variabilidade mensal da precipitação. ....   | 95 |
| Figura 4.36 – Variabilidade mensal da precipitação. ....   | 95 |
| Figura 4.37 – Variabilidade mensal da precipitação. ....   | 95 |
| Figura 4.38 – Variabilidade mensal da precipitação. ....   | 95 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.39 – Variabilidade mensal da precipitação. ....                              | 95  |
| Figura 4.40 – Variabilidade mensal da precipitação. ....                              | 95  |
| Figura 4.41 – Percentagem da variação mensal da precipitação. ....                    | 96  |
| Figura 4.42 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 97  |
| Figura 4.43 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 97  |
| Figura 4.44 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 97  |
| Figura 4.45 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 97  |
| Figura 4.46 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 97  |
| Figura 4.47 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 97  |
| Figura 4.48 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 98  |
| Figura 4.49 – Variação da precipitação anual. ....                                    | 98  |
| Figura 4.50 – Variação da precipitação com a altitude em cada posto udográfico. ....  | 98  |
| Figura A1. 1 – Posto udográfico Achada Grande. ....                                   | 109 |
| Figura A1. 2 – Posto udográfico Camacha.....  | 110 |
| Figura A1. 3 – Posto udográfico Casa do Barreiro. ....                                | 111 |
| Figura A1. 4 – Posto udográfico Casa Velha (P.F). ....                                | 112 |
| Figura A1. 5 – Posto udográfico Chão das Feiteiras. ....                              | 113 |
| Figura A1. 6 – Posto udográfico Curral das Freiras. ....                              | 114 |
| Figura A1. 7 – Posto udográfico Fajã da Nogueira. ....                                | 115 |
| Figura A1. 8 – Posto udográfico Parque Ecológico Funchal. ....                        | 116 |
| Figura A1. 9 – Posto udográfico Trapiche. ....  | 117 |
| Figura A7. 1 – Variação espacial da precipitação média para os meses de outubro. .... | 131 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura A7. 2 – Variação espacial da precipitação média para os meses de novembro.....   | 131 |
| Figura A7. 3 – Variação espacial da precipitação média para os meses de dezembro. ....  | 131 |
| Figura A7. 4 – Variação espacial da precipitação média para os meses de janeiro.....    | 131 |
| Figura A7. 5 – Variação espacial da precipitação média para os meses de fevereiro. .... | 131 |
| Figura A7. 6 – Variação espacial da precipitação média para os meses de março.....      | 131 |
| Figura A7. 7 – Variação espacial da precipitação média para os meses de abril. ....     | 132 |
| Figura A7. 8 – Variação espacial da precipitação média para os meses de maio.....       | 132 |
| Figura A7. 9 – Variação espacial da precipitação média para os meses de junho.....      | 132 |
| Figura A7. 10 – Variação espacial da precipitação média para os meses de julho. ....    | 132 |
| Figura A7. 11 – Variação espacial da precipitação média para os meses de agosto. ....   | 132 |
| Figura A7. 12 – Variação espacial da precipitação média para os meses de setembro. .... | 132 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Recordes Mundiais de precipitação. Adaptado de [5]. .....  | 14  |
| Tabela 2.2 – Área, perímetro e índice de compacidade para cada bacia hidrográfica em estudo. ....   | 19  |
| Tabela 2.3 – Comprimento e larguras equivalentes, e índice de alongamento. ....   | 19  |
| Tabela 2.4 – Comprimento do maior curso de água e fator de forma para cada bacia hidrográfica. ....   | 20  |
| Tabela 2.5 – Valores da altitude e altura média obtidos para cada uma das bacias hidrográficas. ....  | 24  |
| Tabela 2.6 – Declive médio do principal curso de água das bacias hidrográficas em estudo. ....  | 26  |
| Tabela 3.1 – Bacias hidrográficas e os postos udográficos correspondentes. ....   | 57  |
| Tabela 3.2 – Percentagem de dias sem registos em cada posto udográfico. ....  | 62  |
| Tabela 3.3 – Postos auxiliares utilizados para a colmatação de lacunas e análise de qualidade dos dados para cada posto analisado. ....                 | 63  |
| Tabela 3.4 – Medidas de resumo da precipitação anual para cada posto udográfico. ....   | 70  |
| Tabela 3.5 – Períodos de retorno. ....  | 73  |
| Tabela 3.6 – Tempo de concentração, em horas, para cada uma das bacias hidrográficas em estudo. .   | 75  |
| Tabela 3.7 – Tempo de resposta, em horas, para cada uma das bacias hidrográficas em estudo com base nas diferentes formulações de $t_c$ estudadas. .... | 76  |
| Tabela 4.1 – Precipitação diária máxima anual, máximas, em cada posto udográfico em estudo. ....  | 87  |
| Tabela 4.2 - Precipitação máxima acumulada em 10 dias. ....   | 90  |
| Tabela 4.3 – Resumo da variabilidade da precipitação entre o semestre húmido e seco. ....   | 96  |
| Tabela A1. 1 – Características do posto udográfico Achada Grande. ....  | 109 |
| Tabela A1. 2 – Características do posto udográfico Camacha. ....  | 110 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela A1. 3 – Características do posto udográfico Casa do Barreiro. ....   | 111 |
| Tabela A1. 4 – Características do posto udográfico Casa Velha (P.F).....  | 112 |
| Tabela A1. 5 – Características do posto udográfico Chão das Feiteiras.....  | 113 |
| Tabela A1. 6 – Características do posto udográfico Curral das Freiras. ....   | 114 |
| Tabela A1. 7 – Características do posto udográfico Fajã da Nogueira.....  | 115 |
| Tabela A1. 8 – Características do posto udográfico PEF. ....  | 116 |
| Tabela A1. 9 – Características do posto udográfico Trapiche.....  | 117 |
| Tabela A2. 1 – Dados para a elaboração da curva hipsométrica da bacia da Ribeira João Gomes.....  | 119 |
| Tabela A2. 2 – Dados para a elaboração da curva hipsométrica da bacia da Ribeira de Santa Luzia. ....                                   | 119 |
| Tabela A2. 3 – Dados para a elaboração da curva hipsométrica da bacia da Ribeira de São João. ....                                      | 120 |
| Tabela A3. 1 – Dados para construção do perfil longitudinal da ribeira de João Gomes.....   | 121 |
| Tabela A3. 2 – Dados para construção do perfil longitudinal da Ribeira de Santa Luzia .....   | 121 |
| Tabela A3. 3 – Dados para construção do perfil longitudinal da Ribeira de São João.....   | 121 |
| Tabela A4. 1 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Achada Grande. ....     | 123 |
| Tabela A4. 2 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Camacha. ....           | 123 |
| Tabela A4. 3 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Casa do Barreiro. ....  | 124 |
| Tabela A4. 4 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Casa Velha.....         | 124 |
| Tabela A4. 5 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Chão das Feiteiras..... | 125 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela A4. 6 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Curral das Freiras. .... | 125 |
| Tabela A4. 7 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Fajã da Nogueira. ....   | 126 |
| Tabela A4. 8 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Trapiche.....            | 126 |
| Tabela A5. 1 – Probabilidade de não excedência posto Achada Grande. ....   | 127 |
| Tabela A5. 2 – Probabilidade de não excedência posto Camacha. ....   | 127 |
| Tabela A5. 3 – Probabilidade de não excedência posto Casa do Barreiro. ....  | 127 |
| Tabela A5. 4 – Probabilidade de não excedência posto Casa Velha.....   | 127 |
| Tabela A5. 5 – Probabilidade de não excedência posto Chão das Feiteiras.....   | 128 |
| Tabela A5. 6 – Probabilidade de não excedência posto Curral das Freiras. ....  | 128 |
| Tabela A5. 7 – Probabilidade de não excedência posto Fajã da Nogueira.....   | 128 |
| Tabela A5. 8 – Probabilidade de não excedência posto Trapiche.....   | 128 |
| Tabela A6. 1 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Achada Grande. ....   | 129 |
| Tabela A6. 2 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Camacha. ....   | 129 |
| Tabela A6. 3 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Casa do Barreiro. ....  | 129 |
| Tabela A6. 4 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Casa Velha. ....  | 129 |
| Tabela A6. 5 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Chão das Feiteiras.....   | 130 |
| Tabela A6. 6 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Curral das Freiras.....   | 130 |
| Tabela A6. 7 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Fajã da Nogueira.....   | 130 |
| Tabela A6. 8 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Trapiche. ....  | 130 |





## SIMBOLOGIA

|        |  |
|--------|--|
| A      | Área   |
| b      | Largura equivalente                                      |
| $b_0$  | Declive no tramo ajustado                                |
| $b_a$  | Declive no tramo não ajustado                            |
| C. a.  | Coeficiente de assimetria                                |
| C.var. | Coeficiente de variação                                  |
| cm     | Centímetro   |
| F      | Probabilidade de Não Excedência                          |
| g      | Coeficiente de Assimetria                                |
| h      | hora   |
| $i_m$  | Declive médio do curso de água principal                 |
| K      | Fator de ajuste, para efeitos do vento                   |
| $K_c$  | Índice de Compacidade ou Índice de Gravelius             |
| $K_F$  | Fator de Forma   |
| $K_L$  | Índice de alongamento                                    |
| Km     | Quilómetro   |
| $Km^2$ | Quilómetro quadrado                                      |
| L      | Comprimento do maior curso de água da bacia hidrográfica |
| l      | Largura média da bacia hidrográfica                      |
| $L'$   | Comprimento equivalente                                  |

|           |  |
|-----------|--|
| $L_b$     | Comprimento do curso de água principal                     |
| M         | Mediana  |
| m         | Metro  |
| mm        | Milímetro  |
| Mod.      | Moda   |
| N         | Tamanho da amostra   |
| °C        | Grau centígrado  |
| p         | Perímetro  |
| P         | Precipitação   |
| $P_0$     | Precipitação observada                                     |
| $P_a$     | Ajuste de precipitação                                     |
| $P_c$     | Precipitação captada antes de ser corrigida                |
| $P_g$     | Precipitação medida pelo udógrafo                          |
| $P_i$     | Precipitação no posto i                                    |
| $P_k$     | Precipitação corrigida                                     |
| $P_x$     | Precipitação a ser calculada                               |
| $Q_{mod}$ | Caudal modular   |
| R         | Coeficiente de correlação                                  |
| $R^2$     | Coeficiente de determinação                                |
| $r_i$     | Distância entre udógrafo com lacunas e udógrafo auxiliar i |
| s         | Desvio Padrão  |
| $s^2$     | Variância  |

|            |   |
|------------|---|
| $T$        | Período de Retorno  |
| $t$        | Tempo   |
| $t_c$      | Tempo de concentração                                     |
| $x_i$      | Valor de ordem $i$ , de uma amostra ou variável aleatória |
| $Z$        | Valor de interpolação em um ponto de interesse            |
| $\Delta h$ | Diferenças de cotas                                       |



## LISTA DE SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ARM    | Águas e Resíduos da Madeira                                  |
| DMC    | Double mass curve  |
| EARAM  | Estudo de Avaliação de Riscos de Aluviões na Ilha da Madeira |
| EML    | Environmental Measurements Limited                           |
| ESRI   | Environmental Systems Research Institute                     |
| IDW    | Inverse Distance Weighting                                   |
| IPMA   | Instituto Português da Água e da Atmosfera                   |
| IR     | Infrared   |
| IST    | Instituto Superior do Técnico                                |
| LREC   | Laboratório Regional de Engenharia Civil                     |
| OCK    | Ordinary CoKriging   |
| OK     | Ordinary Kriging   |
| P(a)   | Precipitação anual   |
| P(d)   | Precipitação diária  |
| P(dma) | Precipitação Diária Máxima Anual                             |
| P(h)   | Precipitação horária   |
| P.F    | Posto florestal  |
| PEF    | Parque Ecológico do Funchal                                  |
| PU     | Posto Udográfico   |
| RADAR  | Radio Detection and Ranging                                  |

|       |   |
|-------|---|
| SIG   | Sistema de Informação Geográfica                    |
| SNIRH | Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos |
| SRES  | Secretaria Regional do Equipamento Social           |
| UK    | Universal Kriging                                   |
| UMa   | Universidade da Madeira                             |
| VIS   | Visível   |
| WMO   | World Meteorological Organization                   |

## INTRODUÇÃO

*“A história da Madeira está muito ligada às ribeiras e às torrentes que nelas correm. Grandes inundações, designadas por aluviões, provocaram, ao longo dos tempos, em alguns pontos da ilha, pelos enormes caudais e materiais carreados, muitas mortes de pessoas e animais e grandes destruições de bens materiais...” [1].*

### 1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

As alterações climáticas são um fenómeno que desde sempre fizeram parte do comportamento normal da Terra, no entanto ao longo dos anos surgiu um aumento da frequência de episódios de precipitação extrema [2]. A ilha da Madeira não é exceção e também tem verificado um aumento do número de aluviões ao longo dos últimos anos, desencadeadas pelas precipitações extremas. A Madeira é a principal e maior ilha do arquipélago com o mesmo nome. O arquipélago é constituído por mais três ilhas, ilha do Porto Santo, ilhas Desertas e ilhas Selvagens, sendo as duas últimas não habitáveis. O arquipélago fica situado no Atlântico Norte, ocupa uma posição central no Atlântico Oriental, entre os paralelos, 30° 01' e 33° 08' e os meridianos, 15° 51' e 17° 16' [1].

Segundo a World Meteorological Organization (WMO) em [3] as aluviões e desastres provocados por cheias têm vindo a aumentar, atingindo sobretudo zonas localizadas nas proximidades da rede hidrográfica, diques e barragens, afetando cada vez mais um maior número de pessoas.

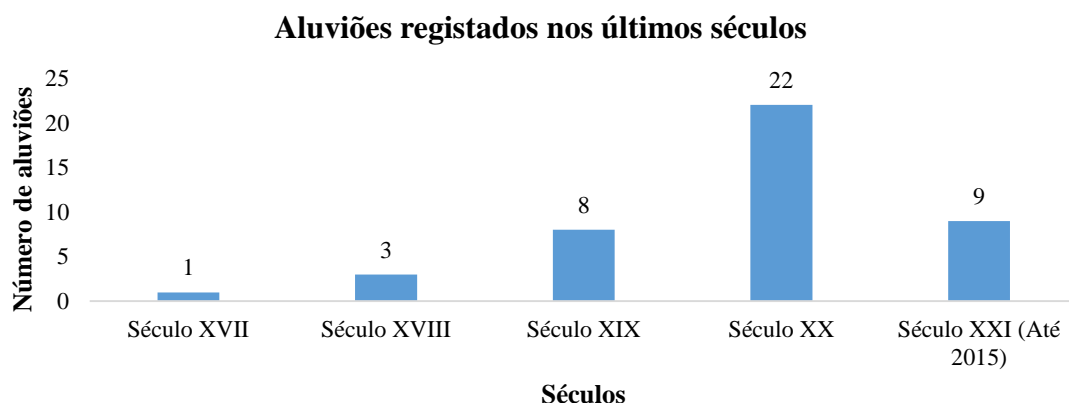
É de grande importância para a Engenharia Civil o estudo das alterações climáticas, isto porque, pode surgir a necessidade de uma revisão dos procedimentos e critérios de projetos, caso se verifiquem variações nas séries hidrológicas. Evitando-se assim o sob ou sobredimensionamento das estruturas.

Devido ao aumento da ocorrência de aluviões e à falta de informação sobre registos de precipitação (séries de dados extensas, e registos inferiores ao dia e inferiores a uma hora), na ilha da Madeira foram desenvolvidos estudos e desenvolvidos projetos para colmatar esta carência de dados, de forma a estudar este fenómeno mais aprofundadamente. O objetivo é o de perceber melhor como se desenvolve na ilha e selecionar a melhor intervenção, atenuando as catástrofes que as aluviões causam à sociedade, como

por exemplo as vítimas mortais e os avultados danos materiais. Neste sentido, está sendo desenvolvido um projeto denominado de Projeto MonitorizaRibeira levado a cabo pelo LREC. Este projeto dá um passo importante para a prevenção de aluviões na ilha da Madeira bem como para a atenuação das suas consequências. É um projeto bastante completo, que consiste na instalação de diferentes equipamentos de monitorização e de alerta, bem como na substituição dos udógrafos tradicionais por udógrafos com teletransmissão de dados para a central de monitorização em tempo real, e na criação de uma base de dados onde poderá ser introduzido todos os dados obtidos, para poderem ser tratados e analisados. O projeto atua na mitigação das aluviões intervindo não apenas na área hidrológica, como também na área da geotecnia.

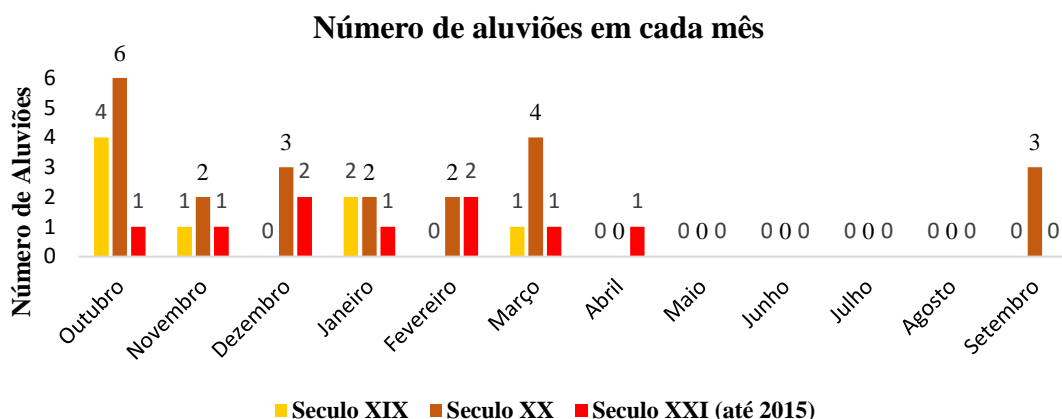
## 1.2. REVISÃO HISTÓRICA DAS ALUVIÕES OCORRIDAS NA ILHA DA MADEIRA

Existem indícios geológicos que evidenciam que a ilha da Madeira é fortemente abrangida por aluviões a vários milhares de anos. Sobre o passado mais recente, Quintal em [4], descreve a ocorrência de algumas aluviões, começando pela aluvião registada no século XVII, no dia 01 de dezembro de 1601. O autor refere ainda outras três aluviões no século XVIII, em 1707 (sem conhecimento da data precisa), a 18 de novembro de 1724 e a 18 de novembro de 1765. No século XIX foram assinaladas 8 aluviões. No século XX, foram registadas 22 aluviões. Já no século XXI, até ao ano de 2015, ocorreram 9 aluviões. Pelo gráfico da Figura 1.1 observa-se que o número de aluviões ao longo dos últimos séculos na ilha da Madeira tem vindo a aumentar substancialmente de século para século. Na Figura 1.2 observa-se que o mês no qual ocorreu um maior número de aluviões foi o mês de outubro com um total de 11, seguido do mês de março com 6 aluviões.



**Figura 1.1 – Aumento do número de aluviões ocorridas/registadas na ilha da Madeira desde o século XVII. Adaptado de [4].**





**Figura 1.2 – Número de aluviões em cada mês, nos séculos XIX, XX e XXI. Adaptado de [4].**

De salientar que o autor contabilizou como sendo aluviões as cheias rápidas que causaram vítimas mortais e grandes estragos materiais.

De entre as aluviões que atingiram a ilha destacam-se a de 9 outubro de 1803 que abrangeu as cidades do Funchal, de Santa Cruz e Machico. Aluvião que vitimou mortalmente 1000 pessoas aproximadamente. Destaca-se também a aluvião de 20 de fevereiro de 2010.

### 1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os postos de medição de precipitação fornecem um elevado conjunto de registos e apenas após o seu tratamento, e organização é que podem ser obtidas as diferentes séries de dados. Estas séries podem ser por exemplo, séries de precipitação em intervalos de; 10 minutos, horários, diários, mensais e anuais. Após o tratamento e organização destas séries de dados procede-se à análise das mesmas. Contudo, para uma análise rigorosa são necessárias séries de dados longos, preferencialmente com pelo menos 30 anos. É extremamente difícil obter séries históricas de dados que sejam suficientemente amplas e que estejam completas para que possam ser prontamente analisadas. Ou seja, sem nenhuma interrupção nas séries, devido a erros de medição ou de recolha de informação.

Este trabalho tem como objetivos analisar e discutir a utilidade dos udógrafos como sistemas que contribuem para o alerta de aluviões e tratar os dados de 9 postos udográficos da rede de udógrafos do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) da ilha da Madeira. Os udógrafos em estudo encontram-se distribuídos por sete diferentes bacias hidrográficas, no entanto para este trabalho académico apenas serão estudadas as três principais bacias hidrográficas do Funchal (bacia hidrográfica da ribeira de João Gomes, bacia hidrográfica da ribeira de Santa Luzia e bacia hidrográfica da ribeira de São João). As características de cada posto udográfico encontram-se expostas no Anexo A1 –

Características dos postos udográficos. Numa primeira fase, são descritos alguns equipamentos de medição de precipitação como soluções de monitorização. É dado maior ênfase ao udógrafo de recetáculos de basculantes, por serem os utilizados pelo LREC. Seguidamente é feito um tratamento das séries de dados, que consiste em desenvolver folhas de cálculo em Excel que permitam a organização dos dados de forma simples, destacando erros de inserção e lacunas. Posteriormente procede-se às correções das lacunas e verificação da qualidade dos dados. Finalmente procede-se à análise dos resultados obtidos, com recurso a gráficos e ao software ArcGIS for Desktop versão 10.4 da ESRI.

Algumas dificuldades foram encontradas no tratamento de dados, por exemplo, nenhum dos postos tem uma série com registo igual ou superior a trinta anos como o recomendado, por se tratar de uma rede recente. Também existem lacunas nos dados existentes que terão de ser preenchidas.

## **1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, aos quais será realizada prontamente uma breve síntese.

O Capítulo 1, é o correspondente à introdução, é realizado o enquadramento do tema, uma breve introdução à história das aluviões ocorridas Madeira e enumerados os objetivos desta dissertação.

No Capítulo 2, designado por “Conceitos relacionados com aluviões equipamentos de medição de precipitação”, foi realizada uma revisão da literatura existente sobre o tema e é neste capítulo que são definidos alguns conceitos relevantes para esta área de estudo. Contém ainda uma descrição de alguns dos equipamentos de medição de precipitação existente, mencionando as suas vantagens e desvantagens, como equipamentos de monitorização, bem como aos erros associados.

No Capítulo 3, intitulado de “Tratamento de dados”, são apresentadas diversas metodologias para a organização dos dados, preenchimento de lacunas; análise de qualidade dos dados e determinação da precipitação ponderada sobre uma determinada região.

No Capítulo 4, denominado de “Análise de dados”, apresenta-se a análise dos resultados obtidos a partir do tratamento de dados efetuado no capítulo 3, recorrendo à interpretação de gráficos, tabelas e representações de mapas, elaborados com recurso ao software ArcGIS for Desktop versão 10.4.

Por último, o Capítulo 5 contém as conclusões finais e possíveis trabalhos futuros nesta área que possam ajudar na mitigação dos impactos provocados pelas aluviões na ilha da Madeira.

# CONCEITOS RELACIONADOS COM ALUVIÕES

## EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO

As cheias ou aluviões são um risco natural de origem climática que acontecem habitualmente devido a precipitações intensas e em geral são antecedidas por longos períodos de precipitação. Segundo Biswas (1972) citado por Hipólito em [5], na antiguidade as cheias eram vistas como uma mais-valia, uma vez que as sociedades estavam adaptadas a elas. Por exemplo, no Egito, no tempo dos faraós foram desenvolvidos extensos sistemas de diques e outras obras hidráulicas para o máximo proveito das cheias de modo que as inundações fertilizassem os campos. Atualmente as aluviões são vistas de forma diferente, devido ao impacto negativo que estas causam na sociedade, leva a que os esforços sociais sejam direcionados no sentido de mitigar os seus efeitos. As consequências sociais e económicas causadas pelas aluviões desencadearam o interesse do estudo deste tipo de fenómeno ao longo dos últimos anos, em diversas áreas como a Geologia, Geotecnia e Engenharia.

Segundo Brum et al em [6], a definição de aluvião é dada como sendo depósitos de cascalheira fluvial, muito heterométrica<sup>1</sup>, e com grau de rolamento variado, podendo ser encontrados em toda a bacia hidrográfica e em zonas de extravasamento de ribeiras em áreas aplanadas.

Na ilha da Madeira o termo “aluvião” é frequentemente aplicado a cheias rápidas (flash floods). O conceito de “cheia” é muito generalizado pelo que não tem nenhuma definição precisa. Contudo, as cheias podem ser entendidas como sendo o aumento da superfície livre do curso de água de forma intensa e prolongada que correspondem a alturas máximas de escoamento excecionais e que se propagam para jusante, provocando a inundação dos terrenos marginais e a ocorrência de danos físicos e materiais. Do ponto de vista hidrológico, por vezes quantifica-se por cheia o resultado da precipitação de tal forma intensa e alongada em uma bacia hidrográfica ou parte dela, que proporciona um caudal que excede 3 a 5 vezes o caudal modular<sup>2</sup>, provocando o extravasamento da mesma [5].

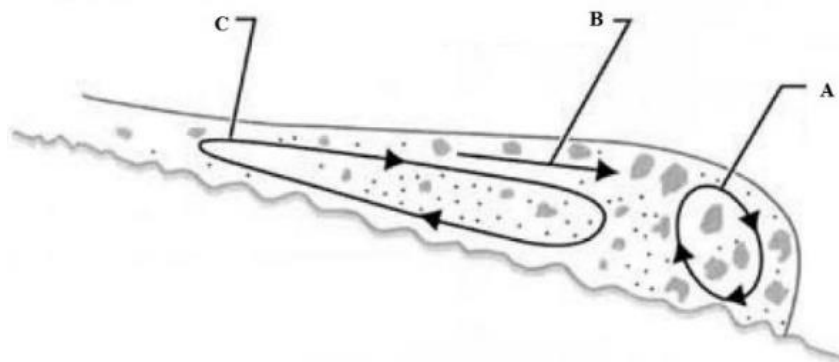
---

<sup>1</sup> Dimensões variadas.

<sup>2</sup> Caudal modular ( $Q_{\text{mod}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]) é o caudal médio em um determinado ano, ou, o caudal médio de uma determinada série de anos de registos [5].

Existem diversos tipos ou circunstâncias de formação de cheias. Podendo ser cheias fluviais ou progressivas; cheias junto à costa associadas a tempestades, também conhecidas por (storm surges), cheias devido ao colapso de diques ou barragens, e finalmente as já referidas, cheias repentinas ou rápidas. Sendo estas as mais comuns na ilha da Madeira, e consideradas as mais perigosas.

O fenómeno que tem vindo a acontecer na Ilha da Madeira, também pode ser caracterizado como sendo movimentos de massa. Iverson em [7] define os movimentos de massa como sendo escoamentos de grandes concentrações de material sólido e líquido que flui como uma onda. Ocorrem a partir de zonas montanhosas que com a ajuda da gravidade chegam a atingir velocidades elevadas. Têm grande capacidade de transporte e elevado poder de destruição. Segundo Arattano em [8], os movimentos de massa são um fenómeno intermediário entre os deslizamentos de terras e uma cheia. O movimento de massa dá-se geralmente em sucessivas vagas em forma de onda, atingem velocidades na ordem dos 5 m/s, podendo chegar aos 10 m/s. Estas ondas formadas pelos movimentos de massa podem ser divididas em três partes principais, como se pode observar na Figura 2.1, frente (A), corpo (B) e cauda (C). A frente íngreme pode atingir vários metros de altura, é constituída maioritariamente por material rochoso de elevado porte e baixo teor de água. Após a frente, surge o corpo da onda que é constituído por uma menor quantidade de material rochoso de elevado porte e maior quantidade de material líquido. Finalmente a cauda é constituída sobretudo por água lamacenta.



**Figura 2.1 – Esquema longitudinal de um movimento de massa. Adaptado de [9].**

Segundo Hipólito em [5], de entre as consequências das aluviões destacam-se as seguintes:

- Possibilidade de perdas de vidas, tanto humana como animal;
- Desalojamento de pessoas;
- Estragos materiais, com ênfase para as infraestruturas;
- Interrupção das vias de comunicação.

Não é possível evitar a ocorrência das aluviões nem extinguir na íntegra as suas consequências, contudo é socialmente aceitável dizer-se que se deve agir com o objetivo de mitigar as suas consequências. Há diversas medidas possíveis de o fazer, tanto de caráter estrutural, como de caráter não estrutural [5].

Segundo Hipólito em [5], às medidas de caráter estrutural passam pela:

- Construção de açudes para a retenção de material sólido de grande porte;
- Regularização fluvial, incluindo o leito de cheias que muitas vezes é ocupado indevidamente;
- Dimensionamento das infraestruturas adotando valores de probabilidade de não excedência socialmente aceitáveis. Uma vez que, quanto mais alta for a probabilidade de não excedência adotada para o dimensionamento de uma estrutura, mais cara será a mesma, tornando-se necessário estabelecer uma relação entre um nível de segurança e o custo.

Segundo Hipólito em [5], das medidas de caráter não estrutural destacam-se:

- Os sistemas de monitorização permitem informar as populações, bem como a mobilização antecipada dos mecanismos de proteção civil;
- A execução de planos de ordenamento físico das bacias hidrográficas para o controlo da ocupação dos leitos de cheias, manutenção da cobertura vegetal e a conservação das linhas de drenagem.
- Ordenamento do território. A delimitação das zonas de riscos são uma componente extremamente importante que podem levar à diminuição das consequências das aluviões.

Segundo Arattano em [8], ambos os sistemas, tanto estruturais como não estruturais são sempre necessários em zonas onde as aluviões coloquem em risco vidas humanas ou proporcionem estragos materiais avultados. Dentro das medidas não estruturais o autor destaca os sistemas de monitorização.

Dividindo os sistemas de monitorização em duas classes:

- Sistema de aviso;
- Sistema de alerta.

O sistema de aviso consiste na colocação no terreno de equipamentos próprios para esta finalidade sendo que estes equipamentos emitem um sinal para a central de monitorização em tempo real indicando a possibilidade de que poderá desencadear-se uma aluvião. Esta previsão é feita com alguma precedência, que pode ir até duas horas de antecedência. Os equipamentos utilizados são, radares meteorológicos e satélites meteorológicos. Estes equipamentos têm a capacidade de estimar a quantidade e intensidade de precipitação e prever a região onde irá acontecer. Em conjunto com o conhecimento das propriedades

geotécnicas do solo, dos seus limiares de precipitação e do conhecimento da quantidade de precipitação ocorrida no local nos dias antecedentes, poderá ser perceptível se irá ou não desencadear-se uma aluvião.

O sistema de alerta consiste na colocação de equipamentos no terreno que emitem um sinal para a central de monitorização em tempo real alertando para a ocorrência e/ou iminência de uma aluvião. Os equipamentos utilizados para esta finalidade são os sensores ultrassónicos, sensores de vibração, sensores de fio, câmaras de vídeo, udógrafos com teletransmissão de dados [10]. Como no caso dos radares e satélites meteorológicos estes precisam igualmente da conjugação dos dados udográficos recolhidos, com o conhecimento das características geotécnicas do solo e dos limiares de precipitação. O equipamento emite um alerta para a central de monitorização de que o limiar de precipitação já foi atingido, o que quer dizer que uma eventual aluvião pode ocorrer ou até que está a ocorrer.

Devido à mais recente aluvião na ilha da Madeira, ocorrida no dia 20 de fevereiro de 2010, a qual provocou a morte a 43 pessoas, a grande maioria no Funchal, 8 desaparecidos, dezenas de feridos, mais de seiscentas pessoas desalojadas e prejuízos na ordem dos mil milhões de euros. A Secretaria Regional do Equipamento Social (SRES) solicitou um aprofundado estudo, sobre os riscos das aluviões na ilha, com o objetivo de poder avaliar e caracterizar este tipo de fenómeno, identificar os pontos onde se deve intervir para garantir a segurança da população e minimizar futuros danos materiais, levando à criação de sistemas de monitorização. Esta investigação intitula-se de “Estudo de Avaliação de Riscos de Aluviões na Ilha da Madeira”, (EARAM) e foi atribuída a três entidades: Ao Instituto Superior Técnico (IST), à Universidade da Madeira (UMa) e ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) [11].

O LREC procedeu à criação de um sistema de monitorização de ribeiras. Este projeto denomina-se de “Projeto MonitorizaRibeiras” tendo como principal objetivo a monitorização automática de ribeiras para a prevenção de riscos de aluviões. O projeto é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Sustentável, ao abrigo do Programa INTERVIR+, Eixo III – Desenvolvimento Sustentável, no âmbito da prevenção, gestão e monitorização de riscos. Este projeto é de elevada importância e uma mais-valia para a atenuação das consequências provocadas pelas aluviões na ilha da Madeira, sobretudo porque foca-se em duas vertentes fulcrais, na monitorização das ribeiras e consequentemente resulta a possibilidade/necessidade de criação de uma base de dados udográficos e da caracterização de pequenas ocorrências de deslizamentos de terra, que permitirão a delimitação de limiares de precipitação. O Projeto MonitorizaRibeira encontra-se em execução nas seguintes bacias hidrográficas: bacia de São João, Santa Luzia e João Gomes, todas estas no Funchal, e para a bacia hidrográfica da Ribeira Brava. A escolha destas bacias deveu-se ao facto de terem sido as mais afetadas na aluvião do dia 20 de fevereiro de 2010. Contudo, o estudo EARAM prevê uma expansão da rede de monitorização a outras bacias hidrográficas.

O facto destas três entidades poderem trocar informações entre si, seria extremamente vantajoso visto que permitiria a obtenção de uma rede udográfica mais condensada, o que consequentemente traria resultados com maior pormenor. Contudo, deve-se alertar que pelo facto de serem entidades diferentes, os equipamentos udográficos serão de modelos diferentes, o que faz com que os dados udográficos obtidos não possam ser simplesmente comparados, tendo por isso que se fazer uma análise em separado a cada um dos equipamentos, antes de serem todos comparados.

As condições atmosféricas e todo o ciclo hidrológico são ocorrências que variam de país para país, o que torna necessário, para um melhor e mais completo conhecimento do fenómeno, uma cooperação internacional à escala mundial. Com o propósito de agrupar os dados meteorológicos de diferentes países foi criada a, World Meteorological Organization (WMO), que tem como objetivo o estudo do comportamento e estado da atmosfera terrestre, a sua interação com os oceanos, e a distribuição resultante dos recursos hídricos [12]. Esta organização é composta por 191 países e estados membros (à data de 1 de janeiro de 2013), de entre os quais Portugal faz parte. Em conjunto contribuem para a padronização e interação dos dados de precipitação referentes a cada um dos países. A WMO fornece inúmeros artigos e guias sobre os mais variados temas dentro da climatologia e hidrologia, dos quais para este trabalho destacam-se por exemplo, as especificações sobre os equipamentos de medição de precipitação mais adequado a colocar numa determinada região ou país, em [13]. Recomendações para a escolha do melhor local onde deve ser colocado o equipamento em uma determinada região, em [3]. E especificações para o tratamento e análise dos dados udográficos, em [14] e [13].

A precipitação é entendida como sendo toda a água que provindo do vapor de água da atmosfera atinge a superfície do globo. Inclui a água que cai numa determinada superfície no estado líquido, sólido, ou de forma oculta [14]. A quantidade de precipitação é dada pela altura ou espessura de água que esta atinge sobre a projeção horizontal de uma superfície. E medida geralmente em milímetros (mm), a qual está subentendida como sendo a altura de água precipitada em um metro quadrado. A altura em milímetros referida, só se aplica para alturas de precipitação no estado líquido, sendo que no caso da precipitação no estado sólido, esta terá que fundir para também poder ser quantificada, ou, em casos onde a precipitação sólida tem grande predominância poderão ser adotadas metodologias apropriadas para a medição de precipitação em estado sólido [15].

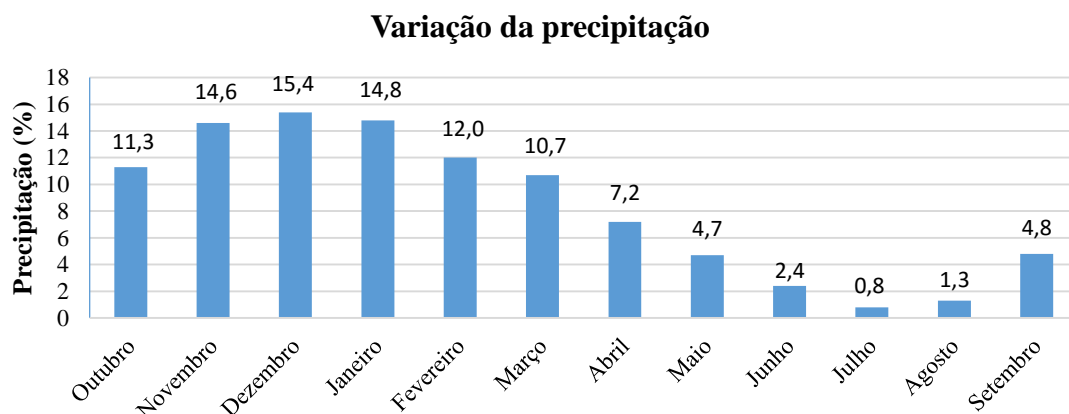
A medição da precipitação tem como objetivo obter amostras representativas da zona onde é recolhida para uma determinada área envolvente. Estas amostras também designadas por séries devem segundo o recomendado pela WMO em [13] ter pelo menos 30 anos. Contudo, segundo Lencastre em [16], pode ler-se que, da análise sobre a influência da extensão do período de observação, feita por Binnie, em 53 estações repartidas por todo o Globo, concluiu que a altura média da precipitação varia pouco se o

período de observação for no mínimo de 20 a 30 anos. Outros autores também partilham desta observação como é o caso de Castany (1963) citado em [1], onde pode ler-se que séries com 20 anos ou superiores não introduzem erros significativos.

## 2.1. VARIAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA ILHA DA MADEIRA

O clima na ilha da Madeira é altamente afetado pela variação do Anticiclone dos Açores. O anticiclone apresenta uma variação anual regular na sua intensidade e na sua localização. Contudo, da variação não só da localização, mas também da intensidade, do desenvolvimento e orientação, do anticiclone surgem mudanças nas características das massas de ar que atingem a Madeira, das quais podem proporcionar precipitações intensas [1]. Devido à variação do anticiclone dos Açores, durante o verão, massas de ar tropical atingem a Madeira, enquanto no inverno, quando o anticiclone retoma a sua posição habitual, mais ao sul, a Madeira é afetada pela frente de ar polar do Atlântico Norte [17].

Segundo Prada em [1], a distribuição sazonal da precipitação na Madeira acontece de outubro a abril, com exceção para algumas zonas situadas a cotas mais baixas da costa sul da ilha, como o Funchal, Ribeira Brava, Bom Sucesso e Lugar de Baixo, cuja distribuição acontece de outubro a março.



**Figura 2.2 – Variação temporal da precipitação na ilha da Madeira. Adaptado de [18].**

A partir do gráfico da Figura 2.2 pode-se observar que a variação da precipitação na ilha da Madeira no semestre húmido é de 79%, e consequentemente de 21% para o semestre seco.

Não é possível definir a distribuição espacial dos valores da precipitação, uma vez que a mesma não varia de forma linear. No entanto, verifica-se certas propensões que afetam a variação da precipitação. Como é o caso da influência da altitude, a influência da inclinação e orientação das vertentes montanhosas e da distância ao mar.

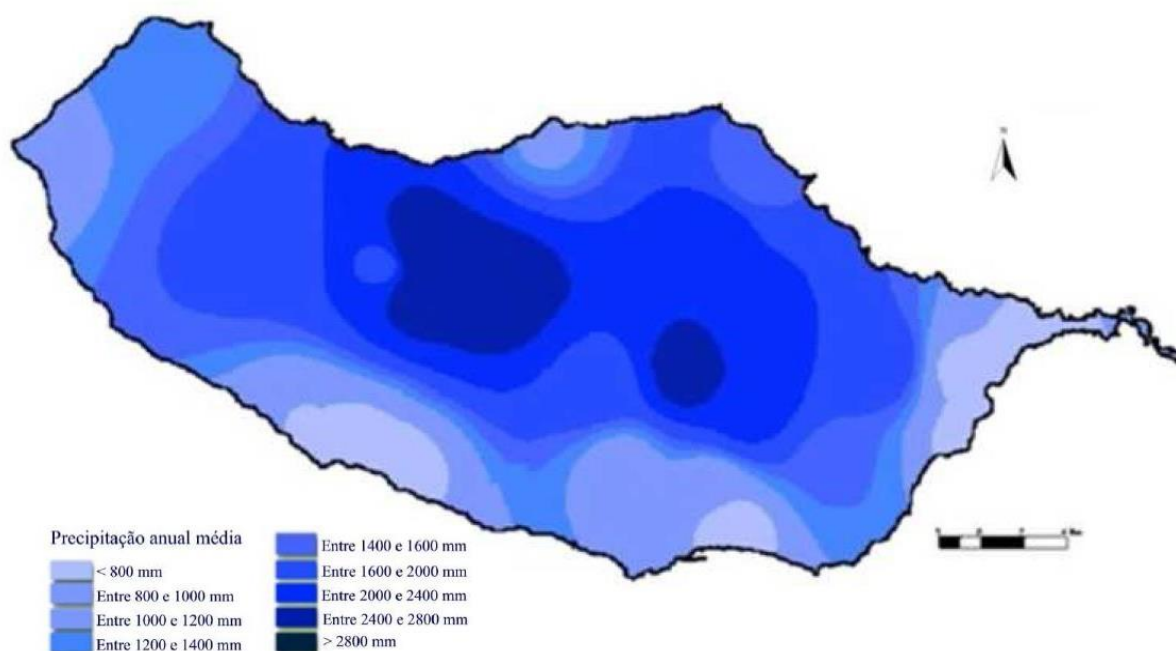


Da influência da altitude verifica-se a existência de uma tendência para um aumento da precipitação com a altitude, até determinado limite. O valor da altitude é tanto maior quanto mais afastada do litoral estiver o cume montanhoso. Por outro lado verifica-se um efeito mais acentuado numa cadeia montanhosa do que num pico isolado [16].

A influência da inclinação e da orientação das vertentes montanhosas deve-se sobretudo aos ventos chuvosos, uma vez que uma superfície inclinada não recebe a mesma quantidade de precipitação que receberia se não o fosse. A precipitação recebida em uma vertente virada a barlavento será superior do que numa vertente a sotavento. Estes aspetos muitas vezes não são tidos em conta na prática quando se procede à colocação dos equipamentos o que induz a erros de medição da precipitação [16].

Na Madeira, existe uma variação da precipitação consoante as vertentes, sendo superior na vertente norte do que no sul para a mesma cota. Existem certos fatores que contribuem para a diversidade da precipitação na Madeira, como o declive do terreno que influencia a ascendência das massas de ar, a orientação dos declives topográficos tendo em conta as direções de avanço das massas de ar húmido e a altitude, fatores estes que estão entre os mais importantes. A precipitação aumenta consoante a altitude na ilha da Madeira, (tal como pode ser perçetível através da Figura 2.3), da seguinte forma: Até à cota dos 600 m a precipitação aumenta com o aumento da altitude de forma rápida. Após os 600 m e até aos 1600 m o aumento da precipitação dá-se de forma mais lenta, com tendência para estabilizar a partir dos 1600 m, como pode ser observado na Figura 2.3. Geralmente as maiores precipitações ocorrem na Bica da Cana, que fica situada a 1560 m de altitude, com um máximo acumulado de 2966,5 mm/ano. No Funchal registam-se os valores mais baixos de precipitação anual com 513 mm [19].

É de extrema importância obterem-se valores de precipitação o mais precisos possível. Para isso, é necessário ter em conta certos cuidados de forma a reduzir os erros de medições, tais como na escolha do local, forma e orientação do equipamento de medição, prevenção de perdas por evaporação, os efeitos do vento, e salpicos de água para fora ou para dentro do aparelho medidor [13]. Segundo a WMO, torna-se mais fácil e fiável a análise da precipitação se utilizarmos os mesmos critérios nas escolhas do tipo de equipamentos de medição, e da localização dos mesmos ao longo das redes. Estes critérios variam consoante as diferentes características de cada país ou região.



**Figura 2.3 – Variação da precipitação com a altitude na ilha da Madeira, adotado de [18].**

### 2.1.1. PRECIPITAÇÕES INTENSAS

Segundo Lencastre em [16] as precipitações intensas são definidas como sendo chuvadas intensas que ocorrem durante os temporais, cuja duração está na ordem de alguns dias até à duração de simples 10 minutos. As precipitações intensas apresentam elevada relevância na ocorrência de aluviões, sobretudo em casos como o da ilha da Madeira que possui bacias hidrográficas pequenas.

O estudo das precipitações intensas são importantes, não só por ser um dos fatores que desencadeiam as aluviões, mas também pela relevância que têm para o dimensionamento de obras hidráulicas, tais como sistemas de drenagem, altura de diques de proteção contra cheias, formas dos descarregadores de barragens, obras de artes, delimitação de áreas suscetíveis a inundações [16]. Entre os parâmetros característicos deste tipo de precipitação destacam-se, a sua intensidade, a duração e a frequência:

- A intensidade da precipitação é o quociente entre a altura de precipitação e a sua duração. Pode ser subdividida em duas categorias, intensidade média e intensidade instantânea.
  - A intensidade média de precipitação pode ser definida como sendo a altura de água precipitada em um metro quadrado durante um certo período de tempo, minutos ou horas, geralmente vem expressa em milímetros por hora (mm/h). A intensidade média de precipitação é dada pela equação (2.1).

$$\bar{i} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Onde:

- $\bar{i}$  – Representa a intensidade média de precipitação em [mm/h] ou [mm/min];
  - $\Delta h$  – Representa a altura da precipitação [mm];
  - $\Delta t$  – Representa o intervalo de tempo pretendido em [h] ou [min].
- A intensidade de precipitação instantânea dá-se quando o intervalo de tempo tende para zero. É expressa pela equação (2.2):

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{dh}{dt} \quad (2.2)$$

Onde:

- $i$  – Representa a precipitação instantânea [mm];
  - $\Delta h$  – Representa a altura da precipitação [mm];
  - $\Delta t$  – Representa o intervalo de tempo pretendido em [h] ou [min].
- A duração, é o tempo considerado para a precipitação, pode ser em dias, horas ou minutos;
  - A frequência, é o número de vezes que um determinado acontecimento sucede em um ano.

O Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) [20], dentro da precipitação faz uma distinção entre chuva e aguaceiros e apresenta valores limites das suas intensidades. A chuva, é a precipitação mais ou menos contínua de gotas de água de dimensões inferiores às dos aguaceiros. A chuva é classificada da seguinte forma:

- De fraca intensidade para valores menores a 0.5 mm/h;
- Moderada para valores compreendidos entre 0.5 mm/h e 4 mm/h;
- Forte para valores superiores a 4 mm/h.

Os aguaceiros são definidos como sendo toda a precipitação que tem um começo e um fim brusco, e por terem variações de intensidade elevadas. Os aguaceiros de chuva são classificados da seguinte forma:

- Fracos para valores menores a 2 mm/h;
- Moderados para valores compreendidos entre 2mm/h e 10 mm/h;
- Fortes para valores compreendidos entre 10 mm/h e 50 mm/h;
- Violentos, para valores superiores a 50 mm/h.

### 2.1.2. RECORDES MUNDIAIS E PORTUGUESES DE PRECIPITAÇÃO

Da comparação dos recordes de precipitação mundiais com os portugueses, observados na Figura 2.4, entre precipitações com durações entre 5 min e 2880 min (48 h), existem semelhanças no proceder da mesma, em que a variação até aos 360 min (6 h) é constante, e a partir das 6 h a diferença aumenta. Contudo, os valores dos recordes portugueses são inferiores, devido provavelmente ao posicionamento geográfico face a zonas de convergência de massas de ar, das quais sobressaem as equatoriais [21].

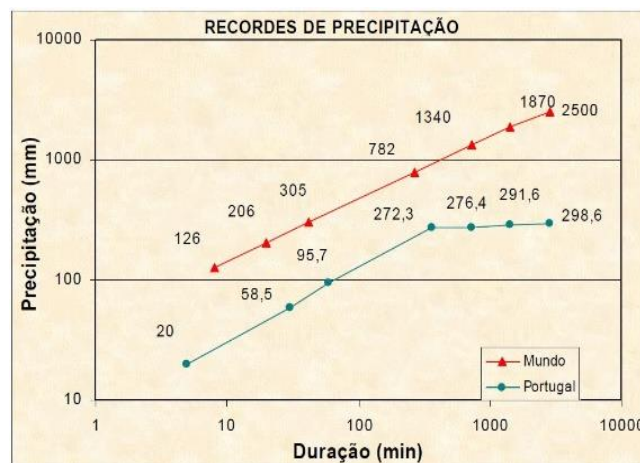


Figura 2.4 – Comparação dos recordes de precipitação mundiais e portugueses [21].

Tabela 2.1 – Recordes Mundiais de precipitação. Adaptado de [5].

| Duração    | Precipitação (mm) | Intensidade Média (mm h <sup>-1</sup> ) | Local                     | Data de início |
|------------|-------------------|---|---------------------------|----------------|
| 1 min.     | 38                | 2280                                    | Barot, Guadalupe          | 26-10-1970     |
| 8 min.     | 126               | 945                                     | Fussen, Baviera           | 25-05-1920     |
| 15 min.    | 198               | 792                                     | Plumb Point, Jamaica      | 12-05-1916     |
| 20 min.    | 206               | 618                                     | Curtea-de-Arges, Roménia  | 07-07-1947     |
| 42 min.    | 305               | 436                                     | Holt, Missouri            | 22-06-1947     |
| 2h 10 min. | 483               | 223                                     | Rockport, West Virginea   | 18-07-1889     |
| 2h 45 min. | 559               | 203                                     | D'Hanis, Texas            | 31-05-1935     |
| 4h 30 min. | 782               | 174                                     | Smethport, Pennsylvanea   | 18-07-1942     |
| 9 horas    | 1087              | 121                                     | Belouve, La Réunion       | 28-02-1964     |
| 12 horas   | 1340              | 112                                     | Belouve, La Réunion       | 18-02-1964     |
| 18h 30min  | 1689              | 91                                      | Belouve, La Réunion       | 28-02-1964     |
| 24 horas   | 1825              | 76                                      | Foc Foc, La Réunion       | 15-03-1952     |
| 2 dias     | 2259              | 47                                      | Hsin Liao, Taiwan         | 17-10-1967     |
| 3 dias     | 2759              | 38                                      | Cherrapunji, Índia        | 12-09-1974     |
| 4 dias     | 3721              | 39                                      | Cherrapunji, Índia        | 12-09-1974     |
| 8 dias     | 3847              | 20                                      | Bellenden Ker, Queensland | 01-01-1979     |
| 15 dias    | 4798              | 13                                      | Cherrapunji, Índia        | 24-06-1931     |
| 31 dias    | 9300              | 13                                      | Cherrapunji, Índia        | Julho 1861     |
| 2 meses    | 12767             | 9                                       | Cherrapunji, Índia        | Junho 1861     |

| <b>Duração</b> | <b>Precipitação (mm)</b> | <b>Intensidade Média (mm h<sup>-1</sup>)</b> | <b>Local</b>       | <b>Data de início</b> |
|----------------|--------------------------|--|--------------------|-----------------------|
| 3 meses        | 16369                    | 7  | Cherrapunji, Índia | Maio 1861             |
| 4 meses        | 18738                    | 6  | Cherrapunji, Índia | Abril 1861            |
| 5 meses        | 20412                    | 6  | Cherrapunji, Índia | Abril 1861            |
| 6 meses        | 22454                    | 5  | Cherrapunji, Índia | Abril 1861            |
| 11 meses       | 22990                    | 3  | Cherrapunji, Índia | Janeiro 1861          |
| 1 ano          | 26461                    | 3  | Cherrapunji, Índia | Agosto 1860           |
| 2 anos         | 40768                    | 2  | Cherrapunji, Índia | Janeiro 1860          |

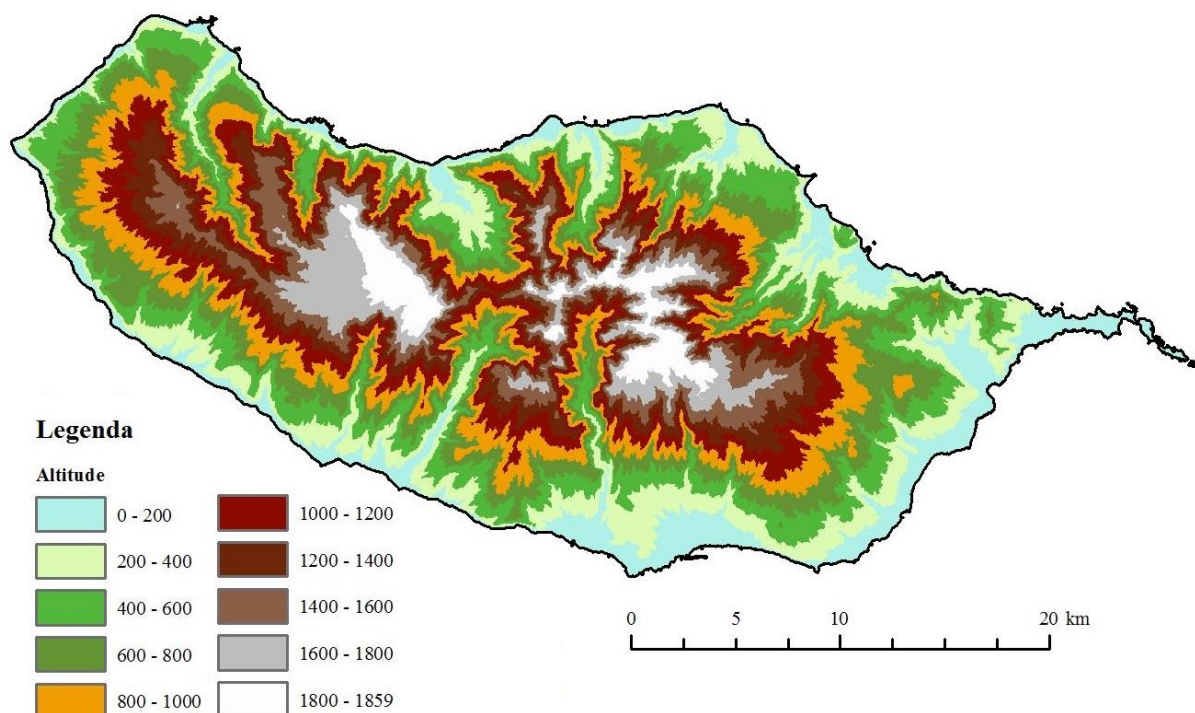
A Tabela 2.1 mostra os recordes mundiais de precipitação de que há registos, para diferentes intensidades, o local onde ocorreram, e o período em que ocorreu. Destacando-se, por um lado a ilha de Guadalupe, onde se registou a maior precipitação ocorrida em um minuto e por outro lado a Índia com vários registos, obtendo precipitações elevadas durante vários dias.

## 2.2. RELEVO DA ILHA DA MADEIRA

A ilha da Madeira é caracterizada pelo seu relevo acidentado, vales profundos, encostas e declives elevados. O Pico Ruivo é o ponto mais alto da ilha, atingindo uma altitude de 1862 m. Seguindo-se o Pico das Torres, com 1847 m, e o Pico do Areeiro com 1818 m. A ilha apresenta uma área de aproximadamente 737 Km<sup>2</sup>, uma extensão que no seu máximo atinge os 58 km no sentido E-W, e 23 km na sua máxima largura no sentido N-S, tem um perímetro de 153 km. Uma quarta parte da área total da Madeira está situada a uma cota superior aos 1000 m. Em torno do seu perímetro existem inúmeras arribas abruptas, das quais se destaca o Cabo Girão com uma altura máxima de 580 m. A ilha apresenta uma altura média de 646 m, um declive médio de 56%, o que evidencia um relevo bastante acentuado. Grande parte da ilha, cerca de 65% da sua área, apresenta declives superiores a 25%. 23% da área da ilha, e tem declives entre os 25% e os 16%. Apenas 12% da área, tem declives inferiores a 16%. As áreas planas, ou relativamente planas, são escassas [1].

Às características do relevo da ilha da Madeira anteriormente referidas, juntamente com o facto das precipitações intensas serem frequentes na Madeira, é adicionada a densidade populacional existente, sobretudo na cidade do Funchal, que tem 60% da população de toda a ilha, o que torna a Madeira extremamente vulnerável às consequências causadas pela ocorrência de aluviões.

A Figura 2.5 mostra o declive da ilha da Madeira numa carta de cores, diferenciadas por curvas de níveis em intervalos de 200 m, elaborado com recurso ao software ArcGIS v10.4.



**Figura 2.5 – Relevo da ilha da Madeira.**

Na Madeira, a precipitação que geralmente desencadeia as aluviões é de grande intensidade e acontece a elevada altitude. Da precipitação intensa resultam os desprendimentos e deslizamento de massas. A Madeira apresenta um elevado declive entre as zonas mais altas e zonas mais baixas em um curto espaço de extensão, seguido de um declive bem menor nas zonas finais das bacias hidrográficas. Consequentemente, os caudais atingem velocidades elevadas onde o declive é mais elevado aumentando o seu poder de transporte, arrastando o material sólido de grande porte, que por sua vez ao chegar às zonas mais baixas de menor declive perdem a capacidade de transporte entupindo os desagues das ribeiras, proporcionando o extravasamento da mesma. Outro facto que agrava as consequências de uma aluvião é o estrangulamento das ribeiras, devido ao estreitamento de determinadas seções das mesmas, provocando expansões dos caudais, tanto líquidos como sólidos, para fora da ribeira proporcionando por vezes grandes estragos materiais e vítimas mortais.

### 2.3. BACIA HIDROGRÁFICA

Uma bacia hidrográfica é uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou por um sistema interligado de cursos de água, fazendo com que todo o caudal seja descarregado através de uma única saída. A delimitação de uma bacia hidrográfica é feita através de dois tipos de linhas, superficiais e freáticas. As linhas superficiais correspondem às linhas de cumeeira. Por outro lado as linhas freáticas em geral são determinadas pela estrutura geológica dos terrenos [16].

As bacias hidrográficas têm grande influência nas consequências causadas pelas aluviões, por isso torna-se também importante o seu estudo de forma a conseguir em conjunto com os dados da precipitação, projetar redes de sistemas de prevenção, tanto estruturais como não estruturais, e torná-las suficientemente seguras em caso de aluvião, para que consigam suportar o transporte do material líquido e sólido. Loureiro (1982) citando por Prada em [1] delimitou 126 bacias hidrográficas na ilha da Madeira, das quais foram identificadas 234 linhas de água.

Estudos definiram índices para traduzir de forma quantitativa algumas características, que servem de referência para a análise do comportamento de uma bacia. Os índices definidos servem de comparação entre características morfológicas de bacias, e com isso saber o quão vulnerável é uma bacia no caso de precipitações intensas [15].

### **2.3.1. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE UMA BACIA**

#### **2.3.1.1. ÁREA DE DRENAGEM E PERÍMETRO**

A área de drenagem de uma bacia é a projeção horizontal limitada pelas linhas de separação topográfica. Calculada através de planimetria em mapas de grandes escalas (geralmente 1:50 000 ou 1: 25 000) ou com recurso a SIG (Sistema de informação Geográfica). É expressa em quilómetros quadrados ( $\text{Km}^2$ ). O perímetro é o comprimento da delimitação da bacia e é expresso em quilómetros (Km) [16].

#### **2.3.1.2. FORMA**

A forma da bacia hidrográfica pode ser caracterizada pelo índice de compacidade (ou índice de Gravelius),  $K_c$ , e pelo fator de forma,  $K_f$ . A geometria da bacia tem principalmente influência na maior ou menor propensão a concentrar o escoamento superficial, sobretudo no caso de ocorrência de precipitações intensas. Por um lado, no caso das bacias hidrográficas de forma arredondada, estas têm maior probabilidade de ocorrências de cheias, uma vez que a sua forma favorece a maior concentração do escoamento. Por outro lado as bacias de forma alongada encontram-se menos sujeitas à ocorrência de cheias, devido a probabilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo a totalidade da bacia ser baixa, também devido ao tempo que cada afluente demora a chegar ao curso de água principal ser variado, o que faz com que os escoamentos surjam na secção de saída de forma distribuída ao longo do tempo [18].

### 2.3.1.3. ÍNDICE DE COMPACIDADE

O índice de compacidade ou de Gravelius,  $K_c$  é a relação entre o perímetro da bacia e uma circunferência de igual área. No mínimo o seu valor será igual à unidade, correspondendo a uma bacia circular. A tendência para grandes cheias será tanto maior quanto maior proximidade à unidade for o coeficiente. Por conseguinte, bacias com formas irregulares obterão um coeficiente superior e a tendência à formação de cheias será menor [5]. Para diferentes valores de  $K_c$  estão associados diversas formas de bacias:

- $K_c = 1$  estamos perante uma bacia de forma circular;
- $K_c = 1.128$  estamos perante uma bacia de forma quadrada;
- $K_c > 1.128$  é necessário determinar o índice de alongamento;  $K_L$ ;
- $K_L > 2$  estamos perante uma bacia alongada.

O índice de Compacidade é dado pela equação (2.3):

$$K_c = 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.3)$$

Onde:

- $K_c$  – Representa o índice de Gravelius [-];
- $P$  – Representa o perímetro da bacia hidrográfica [Km];
- $A$  – Representa a área da circunferência formada pelo perímetro [km<sup>2</sup>].

### 2.3.1.4. ÍNDICE DE ALONGAMENTO

O índice de alongamento relaciona o comprimento e a largura de uma bacia com o comprimento e a largura de um retângulo equivalente. O índice de alongamento pode ser determinado pela equação (2.4).

$$K_L = \frac{L'}{b} \quad (2.4)$$

Onde:

- $K_L$  – Representa o índice de alongamento [-];
- $L'$  – Representa o comprimento do retângulo equivalente [Km];
- $b$  – Representa a largura do retângulo equivalente [Km].



O comprimento do retângulo equivalente ( $L'$ ) pode ser determinado pela equação (2.5):

$$L' = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.128} \left| 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right| \quad (2.5)$$

A largura do retângulo equivalente ( $b$ ) pode ser determinada a partir da equação (2.6).

$$b = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.128} \left| 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right| \quad (2.6)$$

Na Tabela 2.2 pode observar-se as áreas, os perímetros e os coeficientes de compacidade, de cada uma das bacias hidrográficas em estudo. As áreas e os perímetros foram obtidos com recurso ao software ArcGIS versão 10.4, a partir das quais foi possível determinar o coeficiente de compacidade.

**Tabela 2.2 – Área, perímetro e índice de compacidade para cada bacia hidrográfica em estudo.**

| Bacia hidrográfica     | Área [Km <sup>2</sup> ] | Perímetro [Km] | Kc [-] |
|------------------------|-------------------------|----------------|--------|
| Ribeira de João Gomes  | 13.00                   | 21.82          | 1.71   |
| Ribeira de Santa Luzia | 14.36                   | 23.10          | 1.72   |
| Ribeira de São João    | 15.00                   | 23.57          | 1.72   |

Uma vez que todas as bacias apresentam valores dos coeficientes de compacidades superiores a 1.128, tornou-se necessário determinar o índice de alongamento para cada bacia hidrográfica.

**Tabela 2.3 – Comprimento e larguras equivalentes, e índice de alongamento.**

| Bacia hidrográfica     | L' [Km] | b [Km] | K <sub>L</sub> [-] |
|------------------------|---------|--------|--------------------|
| Ribeira de João Gomes  | 9.55    | 1.36   | 7.02               |
| Ribeira de Santa Luzia | 10.13   | 1.42   | 7.15               |
| Ribeira de São João    | 10.33   | 1.45   | 7.12               |

Tendo em conta os resultados obtidos na Tabela 2.3, observa-se que todas as bacias em estudo apresentam coeficientes de alongamentos superiores a 2, tratando-se por isso de bacias alongadas. Os coeficientes de alongamentos superiores a 2, significam que as bacias têm cursos de água longos o que implica maiores tempos de resposta, e maiores tempos de escoamento uma vez que o caudal de água não chega à foz da ribeira toda ao mesmo tempo.

### 2.3.1.5. FATOR DE FORMA

O fator de forma correlaciona a largura média da bacia, com o comprimento do maior curso de água. Este coeficiente tem no seu limite valor igual à unidade, sendo que quanto mais baixo for, menor será a sugestibilidade à ocorrência de cheias [16]. Este coeficiente pode ser obtido pela equação (2.7).

$$K_F = \frac{1}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (2.7)$$

Onde:

- $K_F$  – Representa o fator de forma [-];
- 1 – Representa a largura média da bacia [Km];
- L – Representa o comprimento do maior curso de água [Km].

**Tabela 2.4 – Comprimento do maior curso de água e fator de forma para cada bacia hidrográfica.**

| Bacia hidrográfica     | L [Km] | L <sup>2</sup> [Km <sup>2</sup> ] | K <sub>F</sub> [-] |
|------------------------|--------|-----------------------------------|--------------------|
| Ribeira de João Gomes  | 10.27  | 105.47                            | 0.12               |
| Ribeira de Santa Luzia | 11.35  | 128.82                            | 0.11               |
| Ribeira de São João    | 11.13  | 123.88                            | 0.12               |

Observando os valores do fator de forma de cada uma das bacias, na Tabela 2.4, verifica-se que os valores deste coeficiente são baixos, o que sugere que as bacias apresentam um bom comportamento no caso de ocorrência de aluvião. De referir que a presença da vegetação tem um papel importante na atenuação dos caudais máximos de cheias, limitando as graves consequências provocadas pelas aluviões. A vegetação impede o impacto direto da precipitação no solo, retarda o escoamento superficial o que faz aumentar o tempo para a água se infiltrar, reduz a velocidade de escoamento superficial e reduz a erosão, estabilizando os solos sobretudo em zonas de maior declive.

### 2.3.2. CARATERÍSTICAS DO RELEVO

#### 2.3.2.1. CURVA HIPSOMÉTRICA

A curva hipsométrica é a representação gráfica das áreas ( $A_i$ ), da bacia que fica acima de uma determinada cota ( $Z_i$ ), (exemplos de curvas hipsométricas podem ser observadas na Figura 2.6; Figura 2.8 e Figura 2.10). A cota ( $Z_i$ ) toma como referência o nível médio da água do mar. A área é geralmente expressa em km<sup>2</sup> ou em percentagem em relação a toda a área da bacia. Para a representação gráfica da

curva hipsométrica é necessário recorrer a uma carta hipsométrica. As altitudes foram representadas na carta hipsométrica, a partir de curvas de níveis, recorrendo ao software ArcGIS 10.4 (Figura 2.7; Figura 2.9 e Figura 2.11). Para as curvas hipsométricas das bacias em estudo foram criadas curvas de nível com intervalos de 100 m, recorrendo ao software ArcGIS 10.4. Na Figura 2.7, Figura 2.9 e Figura 2.11 encontram-se as cartas hipsométricas das bacias hidrográficas da Ribeira de João Gomes, Santa Luzia e São João, respetivamente. Na Figura 2.6, Figura 2.8 e Figura 2.10 encontram-se os gráficos referentes às curvas hipsométricas das bacias hidrográficas supracitadas. Todos os dados utilizados para a criação dos gráficos hipsométricos para cada uma das três bacias hidrográficas estão disponíveis no Anexo A2 – Dados para construção das curvas hipsométricas.

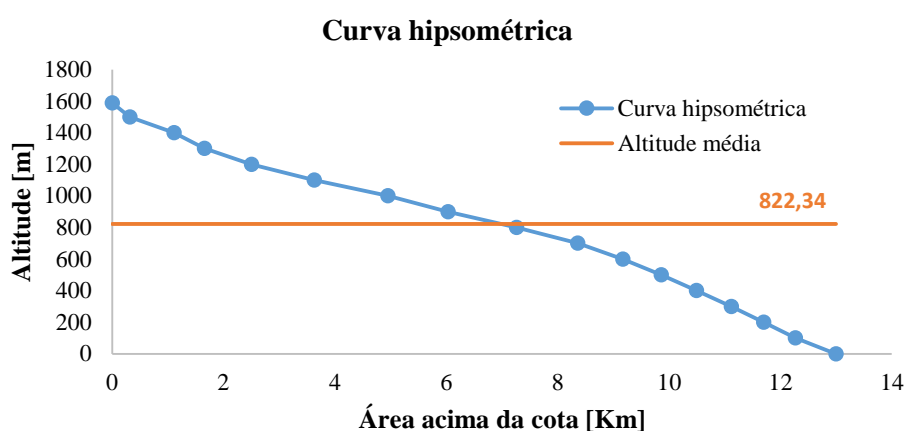


Figura 2.6 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de João Gomes.

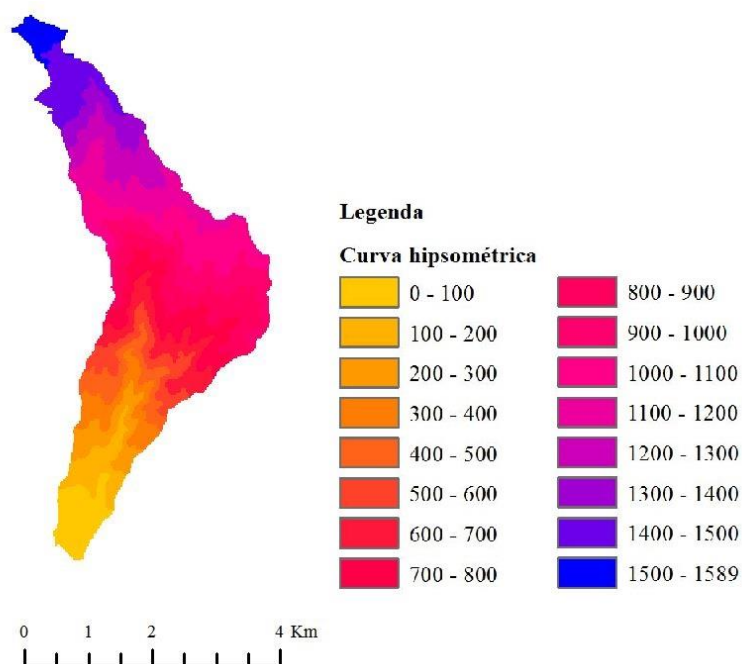


Figura 2.7 – Carta hipsométrica da Ribeira de João Gomes obtida a partir do software ArcGIS 10.4.

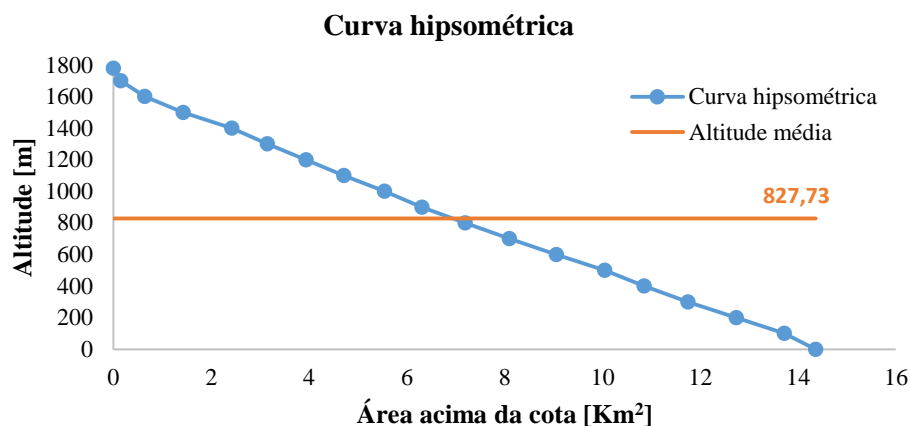


Figura 2.8 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de Santa Luzia.

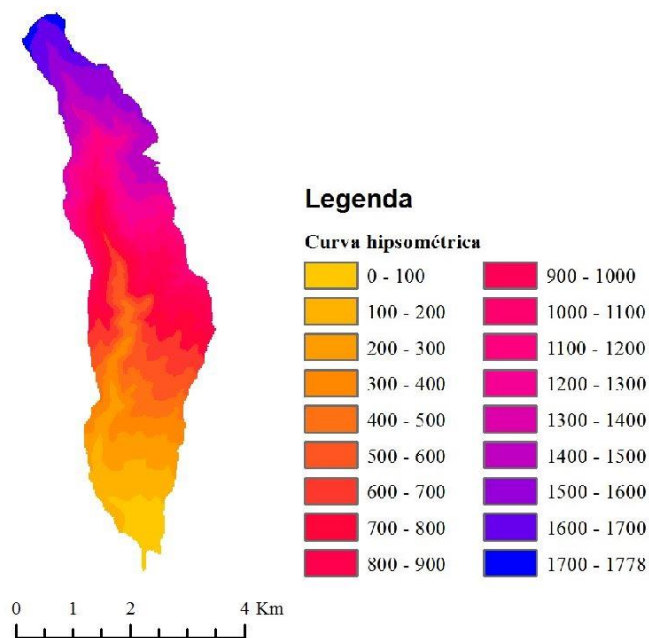


Figura 2.9 – Carta hipsométrica da Ribeira de Santa Luzia obtida a partir do software ArcGIS 10.4.

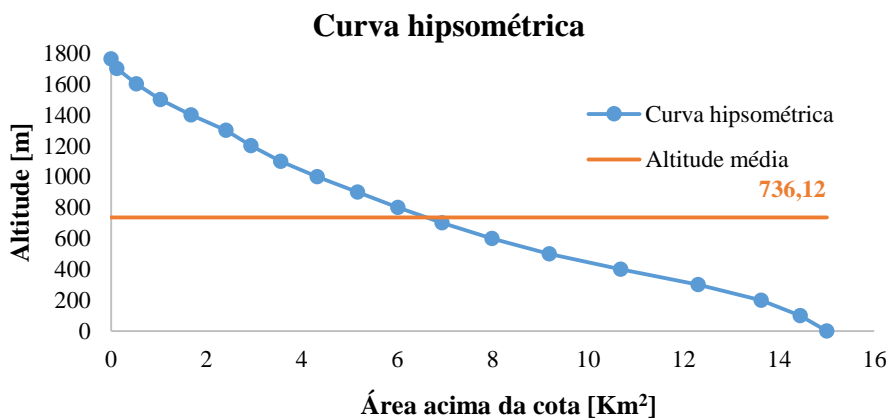
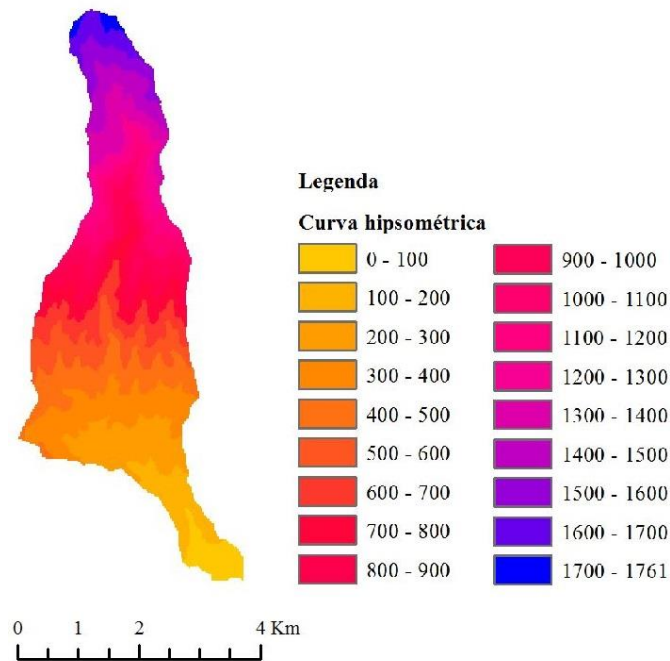


Figura 2.10 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da Ribeira de São João.



**Figura 2.11 – Carta hipsométrica da Ribeira de São João obtida a partir do software ArcGIS 10.4.**

#### 2.3.2.2. ALTITUDE MÉDIA

A altitude média pode ser observada nos gráficos das curvas hipsométricas representadas anteriormente nas figuras: Figura 2.6, Figura 2.8 e Figura 2.10. A altitude média, corresponde à altura de um retângulo com área igual à área da bacia hidrográfica, sendo que o comprimento da bacia corresponde ao comprimento do retângulo e consequentemente a altura do retângulo corresponde à altitude média da bacia. A altitude média pode também ser determinada a partir da equação (2.8).

$$\bar{Z} = \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} (Z_i + Z_{i+1}) \times A_i \quad (2.8)$$

Onde:

- $\bar{Z}$  – Representa a altitude média [m];
- $Z_i$  e  $Z_{i+1}$  – Representa a altitude média entre duas curvas de níveis consecutivas [m];
- $A_i$  – Representa a área entre duas curvas de níveis consecutivas [Km<sup>2</sup>];
- $A$  – Representa a área da bacia hidrográfica em análise [Km<sup>2</sup>].

## 2.3.2.3. ALTURA MÉDIA

A altura média de uma bacia indica se a bacia é muito ou pouco acidentada. Geralmente bacias com alturas médias mais elevadas apresentam quedas mais elevadas, que podem ser aproveitadas para a produção de energia hidroelétrica [5]. Por outro lado em caso de aluvião, as mesmas quedas fornecem energia às massas sólidas transportadas, aumentando as suas velocidades e poder de destruição.

A altura média é dada pela equação (2.9):

$$\bar{H} = \bar{Z} - Z_{\min} \quad (2.9)$$

Onde:

- $\bar{H}$  – Representa a altura média [m];
- $\bar{Z}$  – Representa a altitude média [m];
- $Z_{\min}$  – Representa a altitude no ponto de referência. Neste caso o ponto de referência é a altitude ao nível do mar [m].

Os dados utilizados para a obtenção dos valores de altitude média e altura média encontram-se tabelados no Anexo A2 – Dados para construção das curvas hipsométricas.

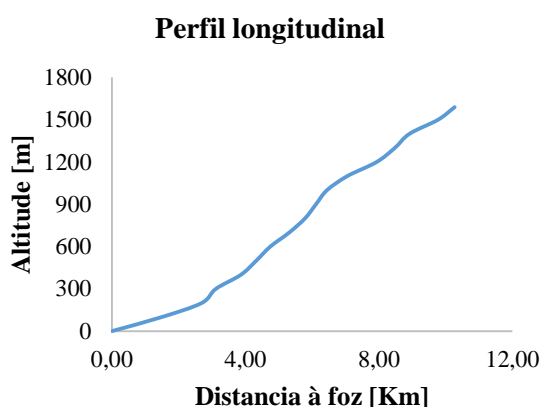
**Tabela 2.5 – Valores da altitude e altura média obtidos para cada uma das bacias hidrográficas.**

| Bacia hidrográfica     | Altitude média [m] | Altura média [m] |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Ribeira de João Gomes  | 822.34             | 822.34           |
| Ribeira de Santa Luzia | 827.73             | 827.73           |
| Ribeira de São João    | 736.12             | 736.12           |

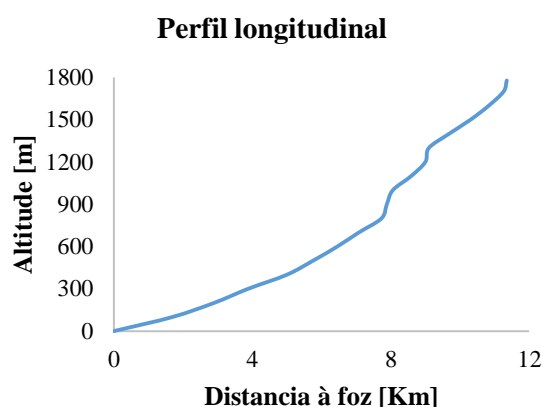
## 2.3.2.4. PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO DE ÁGUA

O perfil longitudinal do curso de água é a representação gráfica entre as cotas do leito e a sua distância à secção de referência. Para este trabalho será a foz da ribeira a secção de referência. Contudo, nos casos que se queiram determinar o perfil dos afluentes a secção de referência adotada é a secção de confluência. O perfil longitudinal tem como objetivo dar uma noção imediata sobre as zonas de maior queda ao longo do curso de água, bem como das zonas mais planas [5]. Por esta razão o perfil longitudinal tem elevada importância para o estudo do comportamento das bacias em caso de aluviões, uma vez que para declives elevados, a velocidade do escoamento é mais elevada, e por outro lado em zonas com declives menos elevados a velocidade de escoamento e poder de transporte é menor o que torna essa zona vulnerável a inundações.

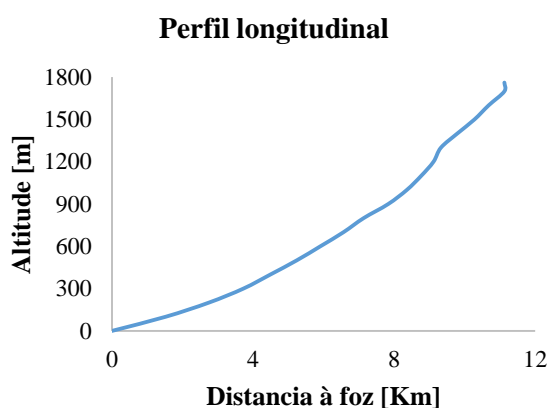
Seguidamente na Figura 2.12, Figura 2.13 e Figura 2.14 estão representados os perfis longitudinais das ribeiras de João Gomes, Santa Luzia e São João respetivamente. Os dados utilizados para a construção destes perfis foram obtidos recorrendo ao ArcGIS 10.4. Os dados para a construção dos perfis longitudinais podem ser consultados no Anexo A3 – Dados para construção dos perfis longitudinais.



**Figura 2.12 – Perfil longitudinal da Ribeira de João Gomes.**



**Figura 2.13 – Perfil longitudinal da Ribeira de Santa Luzia.**



**Figura 2.14 – Perfil longitudinal da Ribeira de São João.**

#### 2.3.2.5. DECLIVE MÉDIO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL

O declive médio do curso de água principal é obtido dividindo a diferença entre a altitude máxima e mínima pelo comprimento do curso de água principal. De forma análoga é possível determinar o declive médio para um determinado troço da ribeira. O declive médio é dado pela equação (2.10):

$$i_{\text{méd}} = \frac{Z_{\text{máx}} - Z_{\text{min}}}{L} \quad (2.10)$$

Onde:

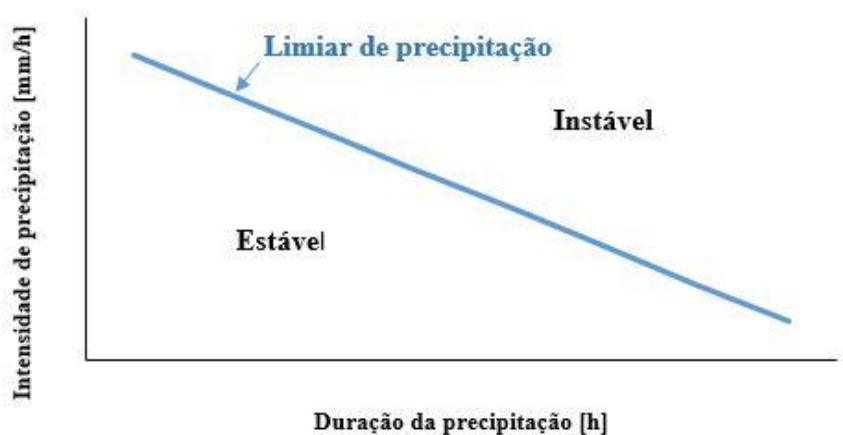
- $i_{\text{méd}}$  – Representa o declive médio [m/m];
- $Z_{\text{máx}}$  – Representa a altitude máxima da bacia hidrográfica [m];
- $Z_{\text{mín}}$  – Representa a altitude mínima da bacia hidrográfica [m];
- $L$  – Representa o comprimento do curso de água principal da bacia hidrográfica [m].

**Tabela 2.6 – Declive médio do principal curso de água das bacias hidrográficas em estudo.**

| Bacia hidrográfica     | Declive médio $i_{\text{méd}}$ [m/m] |
|------------------------|--------------------------------------|
| Ribeira de João Gomes  | 0.155                                |
| Ribeira de Santa Luzia | 0.157                                |
| Ribeira de São João    | 0.158                                |

## 2.4. LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO

Os limiares de precipitação são níveis mínimos e máximos, de precipitação, a partir dos quais pode dizer-se se é expectável ou não a ocorrência de movimentos de massa que possam desencadear uma aluvião. Para o caso dos movimentos de massa desencadeados pela precipitação, podem ser determinados limiares tendo em conta os valores da intensidade de precipitação, da duração da precipitação, da humidade do solo e do nível de pressão de água nos poros do solo. O limiar mínimo pode ser definido como sendo o nível de precipitação abaixo do qual não se dá ocorrência de uma aluvião, e acima do qual é espectável que haja. Por outro lado o nível máximo corresponde ao nível a partir do qual existe uma probabilidade de 100% de ocorrer uma aluvião. Entre ambos os limiares existe um intervalo de incerteza no qual pode ou não ocorrer aluviões [22].



**Figura 2.15 – Esquema de limiar de precipitação para movimentos de vertentes.**



O objetivo dos limiares de precipitação é definir um limite, podendo ser denominado por limiar crítico, que fica entre os limiares mínimos e máximos, para uma determinada região ou bacia hidrográfica, de forma a poderem ser emitidos alertas para as populações, com a ajuda de previsões meteorológicas através de radares meteorológicos ou até com udógrafos com teletransmissão de dados, de que poderá haver ocorrência de aluvião.

Os limiares de precipitação apresentam grandes vantagens quando utilizados como sistema de alerta de aluvião, pois em conjunto com udógrafos com teletransmissão podem ser programados de forma a emitir um alerta para a possibilidade de ocorrência de aluvião sempre que a precipitação se aproximar de um determinado limiar, previamente definido. Os limiares podem ser aplicados para grandes áreas desde que exista uma rede udográfica densa, e séries de dados longos [23].

Os limiares têm vindo a ser desenvolvidos ao longo das últimas décadas, sendo que numa primeira fase, os limiares desenvolvidos eram de níveis globais, ou seja, não tinham em atenção as condições locais de cada região, sendo que eram definidos limites inferiores a partir dos quais se dava os movimentos de massa, não relacionando as propriedades do solo com as condições de precipitação [24].

A segunda geração de limiares baseava-se na relação entre a intensidade e duração da precipitação, com registos de movimentos de massa, podendo assim especificar situações críticas e não críticas [24].

Atualmente os limiares de alerta são mais precisos, e estão divididos em dois tipos de limiares. Limiares de precipitação físicos e limiares de precipitação empíricos.

#### **2.4.1. LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO FÍSICOS**

Os limiares físicos baseiam-se em formulações matemáticas de modelos de estabilidade de vertentes geralmente utilizados na engenharia geotécnica. Este tipo de limiar tem como vantagem o facto de relacionar a morfologia, geologia e propriedades geotécnicas do solo para cada local específico. Por outro lado, os limiares físicos têm como desvantagem o facto de serem extremamente complexos, e de ainda não estarem suficientemente desenvolvidos, para obter resultados fiáveis. Exige também a necessidade do conhecimento detalhado do solo, das características hidrológicas e morfológicas na região a serem delimitados os limiares, o que se revela ser de difícil obtenção, para grandes extensões. [25].

### 2.4.2. LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO EMPÍRICOS

Os limiares empíricos, como o próprio nome indica, baseiam-se no conhecimento empírico, relacionando a precipitação em conjunto com os movimentos de massa ocorridos no passado. Para a definição destes limiares são necessários dados precisos da precipitação bem como da localização e das datas dos movimentos de vertentes. Existem dificuldades na delimitação deste tipo de limiar, que se prende na disponibilidade de informação. Uma vez que para traçar limiares empíricos, os registos dos dados devem ser de boa qualidade, apresentando informações discriminadas sobre a localização e as características da ocorrência. Quanto aos dados de precipitação é necessário uma rede udográfica densa, com séries de dados fiáveis e extensas.

De uma forma muito resumida, a criação de limiares de carácter empírico baseia-se no levantamento histórico de todos os movimentos de vertentes e, para cada ocorrência, escolher o posto mais próximo que melhor se enquadra para caracterizar a área a ser analisada, e relacionar os dados pluviométricos desse posto com as ocorrências de movimentos de massa. De salientar que só podem ser escolhidos os movimentos de massa para análise que disponham de dados pluviométricos referentes ao dia em que se deu a ocorrência [23]. Por estas razões destaca-se a importância do “Projeto MonitorizaRibeira”, e o tratamento de dados que será abordado neste trabalho.

Uma componente fundamental para a criação de limiares de precipitação de carácter empírico passa pela criação de uma base de dados dos eventos, que possa dar resposta a quatro questões fundamentais: onde, como, porquê e quando:

- Onde: Ou seja, a localização exata das áreas de maior probabilidade de ocorrência de eventos;
- Como e Porquê: Com base no conhecimento já adquirido sobre os fatores que provocam, os eventos perceber o que os desencadeou;
- Quando: Interessa saber o momento exato, bem como a distribuição temporal das ocorrências.

As bases de dados, com a finalidade de registar o espaço e o tempo dos eventos perigosos naturais, partem da premissa de que se numa determinada região se deu um desastre, é porque essa região tem um conjunto de características propícias para tal, que se não forem alteradas, deixa a região vulnerável a novos desastres. De certa forma as bases de dados auxiliam na previsão das ocorrências, ajudando por isso à sua mitigação [26].

É importante que as bases de dados estejam bem definidas, contendo as particularidades dos movimentos de massas ocorridos na região onde se irá definir os limiares. Deve conter informações pormenorizadas sobre a distribuição espacial e temporal dos movimentos de vertentes, identificar os principais fatores

que a desencadearam (geralmente duração da precipitações e precipitações intensas), e os danos causados às populações e às infraestruturas. As informações pormenorizadas geralmente são obtidas através dos arquivos de telejornais, jornais, revistas, em casos mais antigos, chegam a ser recolhidas informações em cartas que descrevem tanto quanto possível as ocorrências. Através das informações obtidas interessa analisar a relação entre as ocorrências e a precipitação não só no momento do movimento de massa, como também a precipitação acumulada nas horas e dias antecedentes ao evento. Em Portugal os estudos feitos para a criação de limiares empíricos estabelecem por norma relações entre a precipitação e os eventos de instabilidades para durações de 1, 2, 3, 4 5, 10, 15, 30, 40, 60, 75 e 90 dias antecedentes ao evento [22].

Segundo Zêzere em [23], para Portugal, a determinação de limiares empíricos de precipitação responsáveis pelo desencadeamento de movimentos de massa já foram realizados para a Região a Norte de Lisboa, e para a área da Povoação, na Ilha de S. Miguel nos Açores. Na região Norte de Portugal, existem estudos com resultados preliminares da determinação de limiares empíricos de precipitação.

Estudos levados a cabo em Portugal concluíram que os locais onde ocorriam maiores quantitativos de precipitação, nem sempre eram aqueles onde ocorriam maiores movimentos de massa [22].

Em Portugal Continental foi criada e apresentada em 2012, uma base de dados denominada de “DISASTER”, sobre desastres naturais, orientada para o estudo de cheias e movimentos de vertente que ocorreram em Portugal entre 1865 e 2010. Esta base de dados centrou-se nos eventos que implicaram danos pessoais, tais como mortos, feridos, desaparecidos, evacuados e desalojados. Foi criada recorrendo a jornais diários e semanários de tiragem nacional, regional e local, perfazendo um total de mais de 145 000 exemplares [26].

Na ilha da Madeira e Porto Santo existe uma base de dados sobre desastres naturais, denominada de “GeoRiscos”. Foi elaborada a partir de pesquisa em jornais, revistas, monografias, relatórios, livros, gravuras, fotos, e entrevistas a pessoas, num total de 75 000 documentos, que descreveram mais de 1000 desastres naturais [27].

## **2.5. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO**

Segundo Shamasastry (1915), a primeira referência a medições de precipitação, proveem da Índia feita por Kautiya, no século IV A.C. Os equipamentos de medição da altura não passavam de tigelas que continham um bocal de aproximadamente 457 milímetros de diâmetro. A razão pela qual a precipitação

era quantificada nessa altura e nessa região era para fins agrícolas, para saber qual o tipo de semente que deviam semear, as que precisam de mais ou de menos água [28].

Conforme Danby (1933), a segunda referência a registros de precipitação, é na Palestina, no século II A.C. Os equipamentos dessa altura eram descritos como instrumentos em bronze, com aproximadamente 30 centímetros de profundidade e 15 centímetros de diâmetro [28].

Segundo Strangeways em [28] a precipitação começou a ser medida com intuito científico na Europa no século XVII. O autor expõe que a primeira medição de precipitação moderna, foi provavelmente feita por Benedetto Castelli, que escreveu uma carta a Galileu em 1639, na qual descreve que colocou um vaso com aproximadamente 12 centímetros de diâmetro a chuva com o intuito de medir a altura de água precipitada [28].

O primeiro registo de precipitação contínuo foi feito por Towneley entre 1677 e 1703. O aparelho era composto por um funil com 30 centímetros de diâmetro, colocado no telhado da sua casa, do funil saía uma mangueira que o ligava a casa, e num cilindro era recolhida a água captada no funil e medida [28].

Strangeways em [28], comenta que um dos primeiros a expor os medidores de precipitação com os padrões de hoje, foi Dobson, referindo que em Dobson (1777), pode ler-se que os equipamentos devem ser colocados em descampados, a altura do solo, e não no telhado, evitando assim os erros de medição devido ao vento. O vaso utilizado tinha um diâmetro de 30 centímetros.

Na atualidade existem diversos equipamentos medição de precipitação, que variam na sua forma, tamanho, material, método de funcionamento, formato de registo de dados (mecânico ou elétrico) e forma de envio dos dados. Esta diversificação está associada sobretudo às diferentes condições atmosféricas existentes nos diferentes países e ao desenvolvimento da tecnologia. De salientar que as diferenças nos modelos dos equipamentos têm influência na quantidade de precipitação medida [29].

Para o estudo de aluviões, são convenientes os registos de precipitação com intervalos de registos pequenos, sobretudo na Madeira. Isto porque, sabe-se que na Madeira as precipitações que desencadeiam as aluviões dão-se geralmente num curto espaço de tempo. Para além disso as bacias hidrográficas existentes são muito pequenas, com áreas que variam entre 1 Km<sup>2</sup> e 50 Km<sup>2</sup>, fazendo com que tenham tempos de resposta e tempos de concentração muito baixos. Sendo por isso conveniente o estudo da precipitação em intervalos de 10 minutos [30].

Os equipamentos de medição de precipitação podem ser:

- Udómetros ou pluviómetros que são aparelhos totalizadores;

- Udógrafos ou pluviógrafos que são aparelhos registadores;
- Sensores de medição de precipitação a laser;
- Satélites meteorológicos;
- Radares meteorológicos.

Os equipamentos de medição de precipitação, tanto udómetros como udógrafos, mais usuais têm uma face superior de forma anelar destinada à receção da precipitação. Dependendo das condições climáticas do país a face recetora tem uma área compreendida entre 100 e 1000 cm<sup>2</sup>. São colocados a uma altura do solo que varia entre 0.30 e 2.50 m. Para o intervalo de área de superfície recetora anteriormente mencionado, não há influência nos valores de precipitação recolhidos, sendo que quanto maior a superfície recetora mais indicado será o equipamento para a quantificação da precipitação no estado sólido [15]. Quanto à altura a que o equipamento é colocado, verificam-se diferenças na quantidade de precipitação captada. Os equipamentos colocados ao nível do solo são os que fornecem valores mais precisos de precipitação líquida, uma vez que diminui substancialmente os erros induzidos pelo vento ao embater no próprio equipamento. Em geral os equipamentos colocados ao nível do solo registam maiores quantidades de precipitação em relação aos que estão a alturas mais elevadas [14].

Por outro lado existem algumas vantagens em colocar os aparelhos de medição a alturas superiores à do nível do solo, tais como:

- Evitar que os equipamentos fiquem soterrados pela neve;
- Evitar o aumento da quantidade de precipitação contabilizada pelos salpicos da precipitação do exterior para o interior do aparelho, sobretudo nos casos de precipitações intensas;
- Em alguns casos os equipamentos necessitam de ser protegidos por um perímetro vedado. Esta vedação não deve ser colocada a uma altura superior à da altura a que se encontra a superfície recetora do aparelho, para não haver influência do vento sobre a precipitação recolhida.

Em Portugal, os equipamentos geralmente utilizados têm uma face recetora com um diâmetro de 16 cm, (perfazendo uma área de aproximadamente 200 cm<sup>2</sup>), e ficam a uma altura acima do solo de 1.50 m [5]. É importante que haja uma padronização dos dados recolhidos, nos diferentes postos existentes.

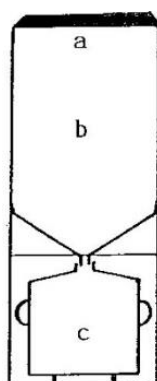
### **2.5.1. UDÓMETRO**

Segundo Lencastre em [16] um simples recipiente que retenha a água pode servir como udómetro, porém devido à necessidade de comparação e tratamento de dados, surgiram os udómetros padronizados. Os udómetros providenciam valores pontuais referentes aos locais onde estão implantados, no entanto

através da interpolação de resultados entre udómetros, são retiradas estimativas de elevada qualidade da precipitação que abrange uma determinada região [31].

Como se pode observar no esquema da Figura 2.16, os udómetros são constituídos por:

- a) Um anel circular na sua superfície que se destina à receção da precipitação;
- b) Um funil, que fica alguns centímetros abaixo do anel circular;
- c) Um reservatório graduado, que armazena a água.



**Figura 2.16 – Esquema de um Udómetro [29].**

O anel circular, deve ter capacidade de evitar salpicos de água do interior para o exterior do equipamento e vice-versa, por isso necessita de paredes verticais suficientemente profundas, e uma borda superior inclinada para dentro de pelo menos 45 graus. De forma a minimizar os erros por perdas pela evaporação, o funil deve ter um orifício pequeno na sua base que permita a passagem da água para o reservatório de modo a isolar ao máximo o mesmo. No reservatório pode ser adicionado um líquido antievaporação que permite a passagem da água sobre si, e forma uma camada protetora sobre a água impedindo a sua evaporação [3].

Os udómetros são equipamentos totalizadores, ou seja, têm por base armazenar a quantidade de água, (altura em milímetros da espessura de água) precipitada durante um determinado período de tempo. A leitura deste equipamento deve ser feita de 12 em 12h ou diariamente entre as 7 e as 9 horas da manhã, por necessidade de padronização dos dados. Contudo, outros períodos de tempo podem ser estipulados. Observa-se a altura de água com a ajuda de uma régua calibrada geralmente incorporada no reservatório. Para uma espessura de 1 mm de água lida equivale a 1 mm de espessura de água precipitada numa projeção horizontal lisa com 1 m<sup>2</sup>, que por sua vez equivale a 1 litro de água.

Estes aparelhos apresentam algumas desvantagens das quais destacam-se:

- O facto de ser um equipamento totalizador impossibilita o registo contínuo dos dados;

- Não permite medir a intensidade de precipitação, que é uma das características mais importantes no estudo da precipitação tendo em conta a previsão das aluviões;
- Existe a necessidade diária de visita ao local para proceder ao registo, o que aumenta os erros e as falhas de registos, especialmente para redes de grandes dimensões que dificultam a padronização dos dados.

### **2.5.2. UDÓGRAFOS**

Os udógrafos são equipamentos semelhantes aos udómetros, com a vantagem de possuírem um dispositivo de registo. Assim, registam a variação da precipitação ao longo do tempo, e permitem determinar a sua intensidade [14].

Existem diferentes tipos de udógrafos de entre os quais destacam-se os seguintes:

- Udógrafo de recipientes basculantes;
- Udógrafo de sifão;
- Udógrafo de balança.

Os udógrafos distinguem-se entre si não só pelos diferentes modelos com formas de funcionamento diferentes, mas também por terem diferentes formas de registo. Os registos podem ser:

- Registos mecânicos (método mais antigo), do qual resultam udogramas;
- Registo eletrónico, com base de armazenamento dos dados captados no próprio equipamento que posteriormente devem ser descarregados para poderem ser analisados;
- Registo eletrónico, com teletransmissão de dados diretamente do equipamento para a central de monitorização em tempo real.

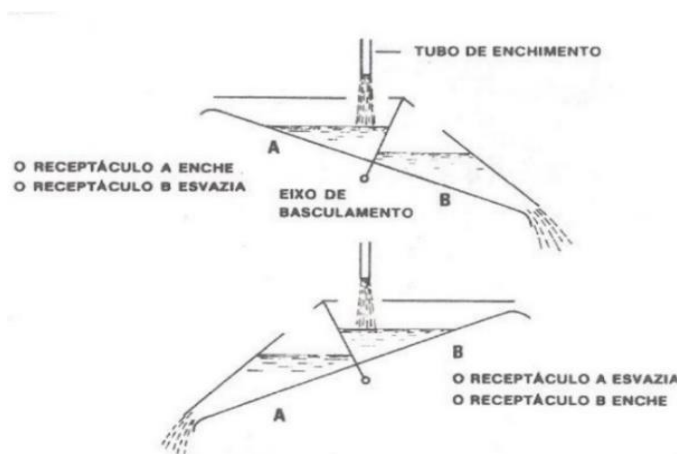
De entre os equipamentos referidos, neste trabalho será dado maior ênfase aos udógrafos de recipientes basculante com sistema de armazenamento de dados, na medida em que são estes os equipamentos utilizados na rede de monitorização do LREC. Todavia, será dada uma breve descrição dos equipamentos mencionados.

#### **2.5.2.1. UDÓGRAFO DE RECIPIENTE BASCULANTE**

Os udógrafos de recipientes basculantes possuem um mecanismo de dois recipientes que se encontram separados por um eixo horizontal, no qual na sua posição inicial os recipientes encontram-se em

equilíbrio instável. O funcionamento baseia-se no enchimento de um dos recipientes com a precipitação captada, ao atingir a sua capacidade máxima, que devido ao peso da própria água e com a ajuda da gravidade, provoca o movimento do mecanismo em forma de baloiço, em que o recipiente carregado desce, o que por sua vez proporciona o descarregamento da água captada, ao mesmo tempo que o recipiente vazio sobe, ocupando a nova posição e função de enchimento de água. Na Figura 2.17 encontra-se representado de forma esquemática o funcionamento do equipamento.

Os recipientes são graduados em fábrica, geralmente têm uma capacidade de armazenamento equivalente a um volume de água de 0.2 ou 0.1 mm, para a obtenção de registos detalhados [6]. A WMO em [4] refere que em zonas onde a precipitação é abundante e de elevada intensidade podem ser adotados recipientes com maiores capacidades (0.5 ou 1.0 mm). Este aumento no tamanho dos recipientes tem a ver com o facto de o recipiente encher rapidamente nas precipitações muito intensas, o que torna difícil para o equipamento acompanhar o ritmo de enchimento e esvaziamento dos recipientes. Este efeito tem maior significado, quando os recipientes são pequenos, na medida em que podem não conseguir esvaziar na íntegra a água captada, fazendo com que quando o recipiente volte à posição de recolha de água, este ainda tenha algum volume de água, proporcionando assim erros na recolha de dados.



**Figura 2.17 – Esquema de funcionamento de um udógrafo de recipientes basculantes [16].**

O funcionamento eletrónico deste tipo de udógrafo baseia-se no registo de um sinal (pulso) cada vez que o recipiente esvazia. É armazenado numa base de armazenamento existente no próprio aparelho, o número de vezes que o recipiente balanceou em 10 minutos. O qual posteriormente pode ser descarregado para um computador, que permite obter toda a informação referente à precipitação de um determinado período de tempo. Este tipo de equipamento implica a necessidade de visita periódica ao posto udográfico para descarregar os dados. A visita ao local pode ser feita em períodos de tempo alargados, mensal ou para grupos de meses dependendo da capacidade de armazenamento do equipamento. A título de exemplo a quantificação da precipitação em um udógrafo cujos recipientes



estejam graduados para um volume de 0.2 mm, se forem registados 60 pulsos em 10 min, quer dizer que nesse intervalo de tempo a precipitação foi de 12 mm/10 min. Se for o caso de um udógrafo cujos recetáculos estejam graduados para 1.0 mm, se forem registados 60 pulsos em 10 minutos, quer dizer que a precipitação foi de 60 mm/10min.

Existe ainda uma outra forma de recolha de dados, através da teletransmissão de dados, que envia em tempo real os dados recolhidos diretamente do equipamento para a central de monitorização. Este procedimento torna este tipo de equipamento bastante vantajoso, em relação aos outros equipamentos, sobretudo se se pretender utilizar o udógrafos, como instrumento de aviso de aluviões, mas também porque deixa de ser necessário a constante visita ao local para descarregar os dados. Os udógrafos eletrónicos com capacidade de teletransmissão de dados são geralmente acompanhados de um painel solar, para fornecer a energia aos equipamentos [32]. De salientar que mesmo para udógrafos com teletransmissão de dados são sempre necessárias visitas ao local para fins de manutenção. Recomendam-se visitas em períodos de 6 meses. A manutenção consiste em:

- Limpeza do equipamento;
- Limpeza do terreno em redor do equipamento;
- Verificação da necessidade de reparação;
- Verificar se o nível do equipamento sofreu alterações;
- Verificação da necessidade de calibrar o aparelho.

A calibração do equipamento consiste na verificação de cada basculamento e se este, está realmente associado ao volume de água para o qual foi originalmente calibrado. A calibração é feita simulando uma precipitação, ou seja, introduzindo uma certa quantidade de água previamente definida e contar o número de vezes que os recetáculos balançam. Assim sendo, consegue-se saber se os recetáculos balançaram o número de vezes referente à quantidade de água introduzida. No caso do número de balanços não coincidir, o equipamento necessita de reparação que é feita em laboratório [14].

Os udógrafos utilizados na rede do LREC são do tipo de recetáculo basculante, têm 200 cm<sup>2</sup> de área na fase recetora, e ficam a uma altura do solo de 1.5 m, tal como o recomendado pela WMO para Portugal. No que toca ao tipo de registo dos dados é feito em formato digital ficando armazenado no datalogger do equipamento, devendo ser descarregados em períodos de aproximadamente três meses. Existem três modelos diferentes:

- Udógrafo automático Modelo ARG100 (Environmental Measurements Limited) com resolução de 0.2 mm (cada recetáculo). Figura 2.18;

- Udógrafo automático Modelo Rain-O-Matic (Pronamic), com resolução de 0.2 mm (cada recetáculo). Figura 2.19;
- Udógrafo automático Modelo Rain-O-Matic (Pronamic), com resolução de 0.5 mm (cada recetáculo). Figura 2.19.

Segundo a WMO em [14] os instrumentos de medição de precipitação têm entre si, erros de medição que são em tudo semelhantes. Contudo, existem erros que são específicos de cada tipo de equipamento. Os udógrafos de recetáculo basculante, devido às suas características, possuem erros específicos e únicos deste tipo de equipamento, descritos de seguida:

- No caso de precipitações intensas, dá-se perda de água durante a inclinação do recetáculo. Que apesar de ser considerada muito pequena não se pode suprimir;
- Devido ao formato do equipamento existe uma área de exposição superficial de água (no recetáculo), desta exposição surgem evaporações, que são significativas especialmente em climas mais quentes e quando a precipitação é de baixa intensidade;
- No caso de chuvas muito fracas, é difícil saber a hora de início da mesma uma vez que para isso, o recetáculo teria de balançar pelo menos uma vez;
- Dependendo do tamanho dos recetáculos e da intensidade de precipitação, pode não dar tempo a que o recetáculo esvazie a água por completo antes de voltar à posição de enchimento, introduzindo um erro por este não encher a quantidade de água estipulada;
- O equipamento não funciona de forma adequada quando não está bem nivelado.



**Figura 2.18 – Udógrafo de recetáculos basculante, modelo ARG100 da EML.**



**Figura 2.19 – Udógrafo de recetáculos basculantes, modelo Rain-O-Matic da Pronamic.**

### 2.5.2.2. UDÓGRAFO DE SIFÃO

O funcionamento deste tipo de equipamento baseia-se na recolha da água precipitada através do recetor, e reencaminha-a para um depósito, no qual existe um flutuador e um sifão. À medida que o depósito enche provoca a subida do flutuador. Ao flutuador está conectada uma haste, que por sua vez possui um braço com um marcador de registo na sua extremidade superior para a escrita no papel de registo. O papel de registo por sua vez está colocado em volta de um tambor rotativo, que possui um mecanismo com temporizador, que provoca movimento giratório em torno do seu próprio eixo, podendo ser ajustado o tempo durante o qual se pretende que este complete uma volta (dia, semanas ou meses) e registar assim a variação da precipitação. O sifão é acionado quando o depósito está cheio permitindo o esvaziamento do depósito para evitar a sua saturação.

Neste caso os dados são registados, em udogramas como mostra a Figura 2.21, e permitem conhecer a variação da precipitação ao longo do tempo, a sua intensidade e quantidade. De referir que para a leitura destes gráficos é necessário ter em conta, por um lado que uma linha horizontal sem variação indica que não houve precipitação, por outro lado, uma linha reta vertical formada em um curto período de tempo (geralmente entre 11 e 15 segundos) indica que o sifão foi acionado e deu-se o esvaziamento do depósito, e não que a precipitação parou repentinamente [6].

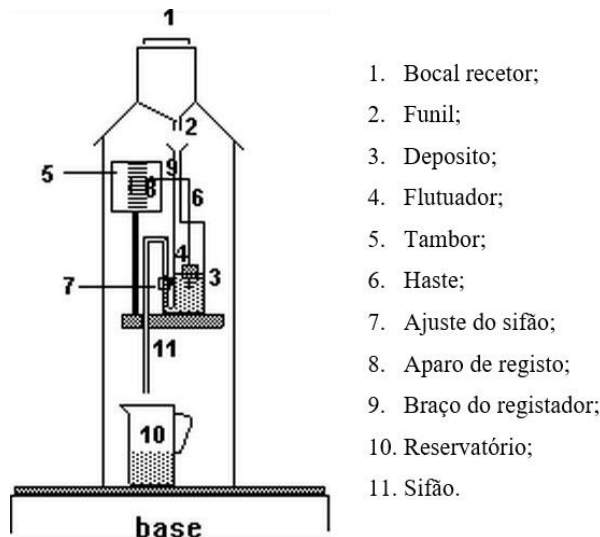


Figura 2.20 – Esquema e legenda de um udógrafo de sifão. Adaptado de [33].

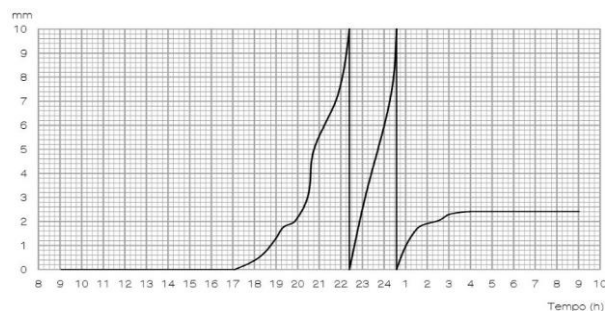


Figura 2.21 – Udograma de um udógrafo de sifão [34].

### 2.5.2.3. UDÓGRAFO DE BALANÇA

Estes equipamentos são constituídos à semelhança dos anteriores, por um bocal recetor, um funil e por um reservatório. Sob o reservatório têm uma balança que regista o peso da precipitação acumulada no

reservatório. A partir do peso registado é possível fazer-se a conversão do peso da precipitação para a altura em milímetros de precipitação. Possuem na base do reservatório uma válvula que permite o seu esvaziamento sempre que este atinja uma certa quantidade de precipitação. Uma das grandes vantagens deste tipo de aparelho prende-se com o facto de ser o mais apropriado para a medição da precipitação no estado sólido [14].

### **2.5.3. SENSORES DE MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO A LASER**

Os sensores de medição de precipitação a laser detetam e distinguem os diferentes tipos de precipitação, o que os tornam adequados para a medição de todo o tipo de precipitação quer seja líquida, sólida, ou líquida e sólida. O aparelho fornece alguns detalhes sobre as características da precipitação bastante pormenorizados [35]. Os sensores de medição de precipitação a laser conseguem identificar:

- Velocidade de queda de precipitação;
- Tamanho das gotas de água, ou de neve;
- Temperatura da precipitação;
- Quantidade e intensidade de precipitação.

O modo de funcionamento deste equipamento passa pela emissão de um feixe de luz infravermelho (não visível), que forma uma área retangular, cujas medidas variam consoante a marca e modelo do equipamento. Em geral o feixe de luz infravermelho apresenta medidas na ordem dos 2 cm de largura por 30 cm de comprimento e uma espessura inferior a 0.1 cm como se pode observar na Figura 2.22 e na Figura 2.23. Cada vez que uma gota de água intercepe o feixe de luz, provoca uma interrupção no sinal de luz infravermelho. A partir da amplitude e do tempo durante o qual a gota demora a passar pelo sinal este estima o seu diâmetro e a sua velocidade. Quanto à quantidade de precipitação e à sua intensidade, são determinadas pelo equipamento através do processamento dos dados referentes à da precipitação intercetada ao longo do feixe de luz durante um certo período de tempo. O equipamento consegue medir intensidade de precipitação com intensidades desde os 0.001 mm/h.

Quanto à diferenciação do tipo de precipitação, é feita relacionando o diâmetro das partículas com a velocidade de queda. A temperatura também ajuda na diferenciação do tipo de precipitação. Sendo que para precipitações com temperaturas:

- Acima dos 9 °C são entendidas como sendo líquidas, com exceção do granizo;
- Inferiores a -4 °C são entendidas como sendo precipitações sólidas;
- No intervalo entre as -4°C e os 9°C todos os tipos de precipitações são possíveis.

Este tipo de equipamento apresenta como vantagens os seguintes aspetos:

- Funcionam como equipamentos de aviso de aluvião, uma vez que possuem sistema de teletransmissão de dados em direto para a central de monitorização.
- Requerem pouca manutenção. Os vidros do sensor possuem um aquecedor incorporado permitindo descongelar no caso a acumulação de gelo se necessário;
- O aparelho não tem problemas com a evaporação à semelhança dos udómetros e udógrafos, uma vez que não está em contacto direto com a água.

E como desvantagens os seguintes aspetos:

- À semelhança dos udógrafos, o vento tem grande influência na determinação da quantidade e intensidade de precipitação;
- No caso das precipitações intensas, o feixe de luz infravermelho pode ser interrompido por mais do que uma gota em simultâneo o que influencia na leitura dos dados pois pode detetar apenas uma das gotas.



**Figura 2.22 – Sensor de medição de precipitação a laser. Adotado de [36].**



**Figura 2.23 – Esquema do feixe de luz infravermelho do sensor de medição de precipitação a laser. Adotado de [36].**

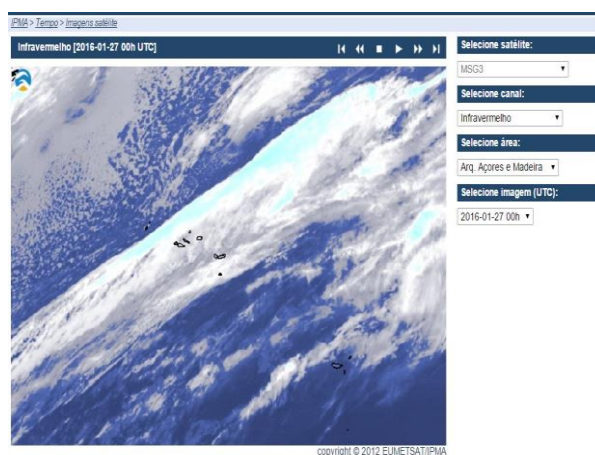
#### **2.5.4. SATÉLITES METEOROLÓGICOS**

Os satélites meteorológicos acompanham a precipitação contida nas nuvens, a partir das quais é estimada a quantidade de precipitação que resulta da transformação do vapor de água em água. Fornece uma estimativa de qual será a precipitação em uma determinada área, e não em apenas um determinado ponto como acontece com os udómetros e udógrafos [37].

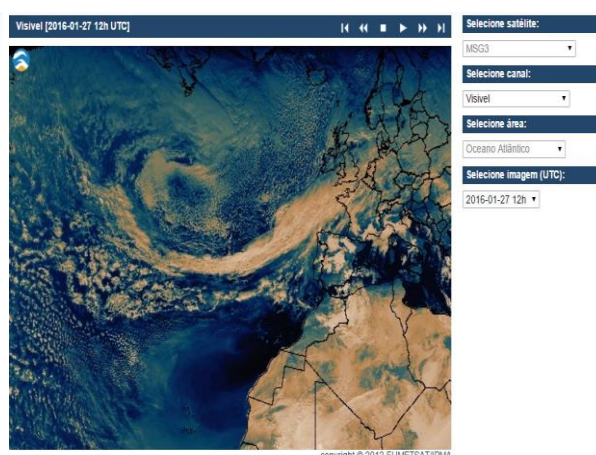
A estimativa da precipitação por satélite baseia-se em técnicas híbridas, que consistem no aproveitamento das informações que são fornecidas por imagens em bandas no infravermelho (IR) e

imagens no visível (VIS) do espectro eletromagnético, e ainda as imagens de sensores de micro-ondas (MW). A estimativa da precipitação em bandas do IR assenta na medição da reflexão do brilho do sol refletida pelas nuvens, o que permite obter a temperatura do topo da nuvem. A partir da temperatura de topo da nuvem é possível estimar o desenvolvimento vertical da mesma, ou seja, temperaturas baixas são indicadores de desenvolvimento vertical elevado, o que por sua vez é um indicador de precipitações intensas. Através das imagens em bandas no VIS, é possível obter uma estimativa do volume da nuvem e consequentemente o volume de água no seu interior. As ondas MW complementam a estimativa da precipitação dos satélites uma vez que conseguem captar a presença de cristais de gelo nas nuvens, o que não é possível captar com recurso às imagens no IR e no VIS [38].

A título de exemplo encontram-se na Figura 2.24 e na Figura 2.25, representadas, uma imagem de satélite em infravermelho sobre o arquipélago dos Açores, e uma imagem de satélite em Visível sobre o Oceano Atlântico.



**Figura 2.24 – Exemplo de uma imagem de satélite em infravermelho, sobre os Arquipélagos dos Açores e da Madeira [39].**



**Figura 2.25 – Exemplo de uma imagem de satélite em Visível sobre o Oceano Atlântico [40].**

### 2.5.5. RADARES METEOROLÓGICOS

A palavra radar vem do inglês RAdio Detection And Ranging, ou seja, deteção e telemetria<sup>3</sup> via rádio. Estes aparelhos dão informações mais pormenorizadas sobre um determinado evento de precipitação do que qualquer um dos equipamentos anteriormente referidos, fornecendo informações detalhadas de forma contínua no tempo e no espaço. O seu funcionamento baseia-se na emissão de ondas

<sup>3</sup> Sistema que permite a medição e transmissão da informação ao operador.

eletromagnéticas na frequência das micro-ondas que têm a capacidade de detetar e localizar objetos à distância, passando posteriormente o reencaminhamento dos dados detetados para a estação de monitorização. Os objetos localizados ou alvos atingidos pelas ondas poderão ser gotículas, gotas de chuva ou granizo, sendo estes alvos meteorológicos. Também podem ser localizados alvos não meteorológicos como o caso de poeiras, insetos entre outros. Com o tratamento dos dados do radar, através de diversos algorítmicos, é possível obter vários produtos, que fornecem informações, tais como a localização exata dos objetos detetados, estimativa da quantidade de precipitação, e a intensidade [20].

Os radares meteorológicos apresentam uma grande vantagem quando utilizados como equipamentos de aviso de aluviões. São aparelhos muito mais precisos e eficazes do que qualquer outro equipamento de medição de precipitação. Conseguem prever com alguma antecendência (minutos ou horas), a ocorrência de um evento de precipitação numa determinada região, estima a sua magnitude, permite acompanhar a deslocação e evolução da precipitação no espaço e no tempo [37].

Os radares meteorológicos, apesar das vantagens, têm também desvantagens. Segundo Hipólito em [5] a qualidade dos radares meteorológicos é muitas vezes afetada devido a:

- Elevações no terreno ou obstáculo de elevada altura que bloqueiam a emissão de feixes do radar;
- Enfraquecimento da radiação pelos gases atmosféricos e pela própria precipitação;
- Má propagação na emissão do feixe emitido;
- Presença de gelo na atmosfera em fusão que intensifica a energia emitida.

A título de exemplo a Figura 2.26, obtida na página do IPMA, mostra a intensidade de precipitação prevista, para um determinado dia sobre Portugal Continental, determinada através do conjunto dos radares meteorológicos Portugueses. Para fins meteorológicos a área abrangida pelo radar considerada eficaz é geralmente entre os 40 e os 300 km de raio, o que permite definir o campo de precipitação nessa zona. Os radares meteorológicos permitem reduzir a rede udométrica e udográfica. Contudo, não é possível eliminar uma rede udográfica em detrimento de um radar, pois os radares são calibrados recorrendo aos dados fornecidos pelos udógrafos [5].

A colocação dos radares meteorológicos deve ser feita em zonas altas e preferencialmente muito acima da superfície do terreno, como podemos observar no exemplo da Figura 2.27, para que desta forma as ondas emitidas pelo radar, não intersem obstáculos que não os meteorológicos.

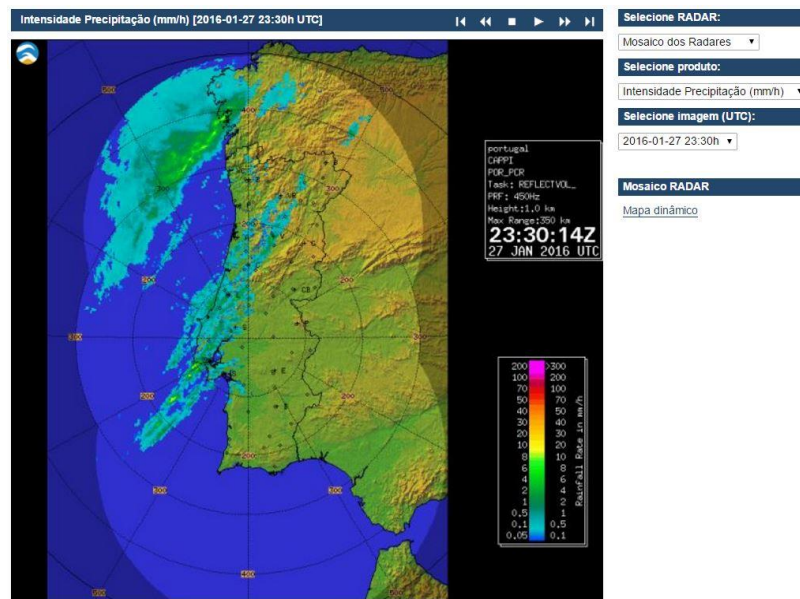


Figura 2.26 – Exemplo de uma imagem de um radar meteorológico [41].



Figura 2.27 – Radar meteorológico de Arouca [42].

## 2.6. UTILIDADE DOS UDÓGRAFOS NA PREVENÇÃO DO RISCO DE ALUVIÃO

Os udógrafos são imprescindíveis para o estudo das aluviões pois fornecem os dados necessários para se proceder a uma análise estatística e complementam as ferramentas utilizadas nos sistemas de monitorização. A partir dos dados dos registados de precipitação, é possível proceder à sua análise recorrendo a ferramentas matemáticas, mais precisamente à estatística, que é bastante utilizada para o estudo de fenómenos climáticos, com o objetivo de obter tendências climáticas, que possibilitam o



estudo de situações extremas [2]. Qualquer um dos equipamentos referidos no subcapítulo 2.5 fornece os dados necessários para se proceder a uma análise estatística dos fenómenos. Contudo, são necessárias séries de dados suficientemente extensos e consistentes, ou seja, sem nenhuma interrupção devido a erros de medição ou de recolha de informação, para que possam ser traçadas tendências fiáveis dos eventos de extremos climáticos como os que causam as aluviões.

Os udógrafos que possuem sistemas de teletransmissão de dados em tempo real, em conjunto com outras ferramentas, podem ser utilizados como equipamentos de aviso de que pode estar em iminência uma aluvião. Dessa forma, os equipamentos podem ser previamente programados para emitir um sinal para a central de monitorização, quando a precipitação registada se aproxime de um determinado limiar. Outro equipamento que pode funcionar como sistema de aviso são os radares meteorológicos. Uma vez que estes conseguem estimar a quantidade e intensidade de precipitação, prever e acompanhar o seu percurso, permite-lhes alertar a central de monitorização com alguma antecedência de que um determinado limiar previamente estipulado, irá ser ultrapassado, o que poderá despoletar uma aluvião.

## **2.7. ERROS DE MEDIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO**

A medição da precipitação de uma determinada área é feita a partir da precipitação medida em um ponto (posto udográfico) a qual posteriormente é extrapolada para a área pretendida na sua periferia, no caso de existir uma rede udográfica. Esta estimativa é feita tendo em conta a proximidade dos udógrafos. De salientar que a estimativa será mais viável se utilizarmos para toda a rede udográfica o mesmo tipo de equipamento udográfico, e se forem utilizados os mesmos critérios na escolha da localização a implantar os equipamentos. É extremamente difícil contabilizar na totalidade a precipitação, uma vez que existem alguns fatores que impedem uma medição perfeita. Como tal, é necessário ter em conta certos cuidados de forma a diminuir ao máximo os erros de medição, para assim obtermos os valores mais precisos.

Segundo a WMO em [13] os cuidados a ter em conta, para obter amostras fiáveis são:

- Escolha adequada do local a colocar o equipamento;
- Prevenção de perda devido aos efeitos do vento;
- Evitar salpicos de precipitação do interior para o exterior do udógrafo e vice-versa;
- Prevenção da perda por evaporação.

Existem outros fatores para além dos mencionados anteriormente que influenciam os resultados. Esses fatores podem ser devido a erros de medição por defeito do próprio aparelho, bem como por uma deficiente instalação ou por falta de manutenção do equipamento [15].

Os erros inerentes a estes equipamentos são em regra de dois tipos, erros sistemáticos ou erros acidentais.

- Os erros sistemáticos, são falhas que se mantêm ao longo do tempo, sem haver uma quebra de informação na série de dados. Podem ser devido a:
  - Má colocação do udógrafo, que proporciona maus registos dos dados;
  - Mudança do local inicial de instalação do equipamento;
  - Mau funcionamento do aparelho, ou desgaste do mesmo com o passar do tempo.
- Quanto aos erros acidentais (também denominados como erros aleatórios), são erros que provocam lacunas no preenchimento das séries. Podem ser devido a:
  - Observações que apresentam interrupções, ou seja, lacunas;
  - Inexistência de informação, que pode ser devido a destruição do aparelho, ou por falta de manutenção do mesmo que impede temporariamente a recolha dos dados.

O vento é o maior causador dos erros de medição de precipitação. O vento provoca dois tipos de erros diferentes. Por um lado, o efeito que o vento causa ao embater no próprio aparelho, que geralmente reduz a quantidade de água recolhida para medição. E por outro lado, devido ao efeito do vento na periferia do local onde está colocado o udógrafo, que quando rodeado por obstáculos, estes provocam turbulência originando erros de medição, que podem ser por excesso como por defeito [3].

Como se pode observar na Figura 2.28 a forma do udógrafo e o seu tamanho têm influência no efeito do vento, que provoca erros nas medições. As linhas contínuas representam o efeito do vento, e as linhas a tracejado representam a precipitação. Nos casos 1, 2 e 3 da Figura 2.28, os equipamentos de medição são maiores e causam por isso maior turbulência no vento, alterando a sua trajetória e impedindo uma boa quantificação da precipitação. Nos casos 4, 5 e 6, os equipamentos são de menor porte sendo que por isso o efeito de turbulência do vento provocado pelo equipamento seja igualmente menor, aumentando consequentemente o rigor dos dados obtidos em relação aos anteriores [3]. É por esta razão que as redes udográficas devem ser constituídas por udógrafos iguais, assim quando se extrapolam os dados de vários udógrafos, para determinar a precipitação numa determinada área, não existam variações significativas nos dados recolhidos entre diversos equipamentos, devido a diferenças de erros.

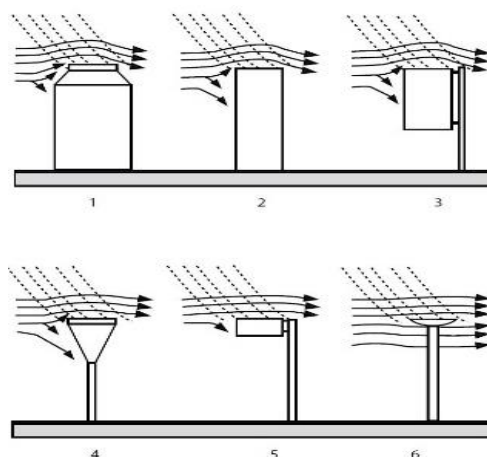


Figura 2.28 – Efeito do vento em diferentes tipos de udógrafos [43].

## 2.8. CORREÇÕES DOS ERROS ASSOCIADOS AOS UDÓGRAFOS DE RECETÁCULOS

É um facto que todas as séries de registos de precipitação apresentam valores de precipitação diferentes daquela que realmente atinge o solo, e isto deve-se a erros. Por essa razão, foram desenvolvidas formulações matemáticas que permitem diminuir os erros associados aos equipamentos para uma melhor quantificação da precipitação. Segundo a WMO em [14], a quantidade de precipitação medida pelos equipamentos pode ser inferior à precipitação que realmente atinge o solo entre 30% e 50%. Estes erros devem-se sobretudo a perdas, devido a erros sistemáticos que variam com o tipo de precipitação, ou seja, se precipitação líquida, sólida ou líquida e sólida. É possível, antes da utilização dos dados, proceder a algumas correções, que se baseiam em adicionar uma pequena percentagem do valor da precipitação captada por cada uma das perdas a que o equipamento está exposto. Contudo, estes ajustes podem ser inexatos, podendo por isso favorecer ou piorar as séries de dados. A WMO recomenda que as séries originais sejam sempre guardadas para servir de base em futuros possíveis ajustes melhorados.

De seguida é exemplificado as percentagens de correção associadas a cada um dos diferentes tipos de erros inerente ao equipamento de captação da precipitação. Como já referido anteriormente existem diferentes tipos de equipamentos de medição de precipitação, sendo que cada um apresenta diferentes tipos de erros. Nesta exemplificação os equipamentos escolhidos foram os udógrafos de recetáculo basculante, uma vez que são os utilizados na rede do LREC. Os erros a que os udógrafos de recetáculos basculantes estão sujeitos são:

- a) Erros devido ao vento no bocal recetor:
  - Geralmente entre 2 e 10% no caso da precipitação líquida e de 10% a 50% no caso de precipitação sólida;

- Os fatores meteorológicos a ter em conta na determinação do valor da percentagem: velocidade do vento no bocal recetor do udógrafo durante a precipitação;
  - Os fatores instrumentais a ter em conta são a forma do udógrafo.
- b) Erros devido a perdas por formação de humidade nas paredes internas do udógrafo:
- Geralmente entre 2 e 10%;
  - Os fatores meteorológicos a ter em conta na determinação do valor da percentagem: intensidade, frequência, quantidade de precipitação e tempo de secagem;
  - Os fatores instrumentais a ter em conta são a forma e a capacidade do udógrafo.
- c) Erros devido à perda por evaporação, dos recetáculos basculantes:
- Entre 2 e 15% no verão e 1 e 8% no inverso;
  - Os fatores meteorológicos a ter em conta na determinação do valor da percentagem são o 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;
  - Os fatores instrumentais a ter em conta são a área do orifício do udógrafo, e tipo de funil. (pode ser reduzida adicionando óleos no reservatórios ou se o tipo de funil apresenta uma pequena área no orifício exposto.
- d) Erros devido aos salpicos tanto para dentro como para fora do aparelho:
- Entre 1 e 2%;
  - Os fatores meteorológicos a ter em conta na determinação do valor da percentagem são a intensidade de precipitação e a velocidade do vento;
  - Os fatores instrumentais a ter em conta são o tipo de instalação do udógrafo, a forma e a profundidade.

A WMO em [14] propõe a equação (2.11) para correção dos aspetos anteriormente referidos, dos valores das séries de registo.

$$P_k = kP_c = k(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4) \quad (2.11)$$

Onde:

- $P_k$  – Representa a quantidade de precipitação corrigida [mm];
- $P_c$  – Representa a quantidade de precipitação captada pelo aparelho após adição dos fatores corretivos [mm];
- $P_g$  – Representa a precipitação medida pelo udógrafo [mm];
- $\Delta P_{1-4}$  – Representam as perdas referidas anteriormente entre os pontos a) a d) [mm];

- K – Representa o fator de ajuste para corrigir o efeito do vento, obtido em laboratório [-].

A WMO em [14] refere que as correções a partir da equação (2.11) podem ser aplicadas a séries de totais diários ou mensais. De salientar que são necessários dados complementares para fazer os ajustes referidos, tais como a velocidade do vento no bocal do medidor durante a precipitação, o tamanho das gotas, a intensidade da precipitação, a temperatura e a humidade do ar. Sendo que o efeito da temperatura é considerado pouco significativo. Por outro lado a velocidade do vento pode ser suficiente para determinar as correções com elevada precisão. Nos locais onde não sejam possíveis fazer estas medições complementares pode-se recorrer a interpolações de medições de postos adjacentes, mas nesses casos as correções devem ser feitas unicamente para os dados de séries mensais.

## **2.9. CONSISTÊNCIA E HOMOGENEIDADE DOS DADOS**

Após o preenchimento de lacunas das séries, é conveniente proceder a uma análise de qualidade dos dados, ou seja, verificar a sua consistência e homogeneidade. Desta forma é possível corrigir ou eliminar séries que não tenham a qualidade pretendida.

### **2.9.1. CONSISTÊNCIA**

Segundo Quintela em [15], uma série diz-se consistente, se não apresentar grandes variações de comportamento quando comparada com séries da sua vizinhança. Também pode dizer-se que uma série é consistente se não houver alterações do erro sistemático de medição. Alterações provocadas por erros sistemáticos, podem ser devido a:

- Alteração da localização do aparelho de medição de precipitação;
- Criação de um obstáculo que influencia os dados recolhidos pelo aparelho;
- Substituição do equipamento de medição;
- Inadequada colocação do equipamento de medição.

Os testes estatísticos mais utilizados para a verificação da consistência das séries são:

- Método duplamente acumulado;
- Método das médias móveis.

### **2.9.2. HOMOGENEIDADE**

Quanto à sua homogeneidade, uma série de dados de precipitação diz-se que o é, quando ao longo do tempo de recolha de dados não houver alteração nos fatores que condicionam o fenómeno traduzido pela grandeza a que se refere a amostra. As quebras de homogeneidade podem ser devido a fatores físicos, como, criação de albufeiras artificiais [15].

Os testes estatísticos mais utilizados para a verificação da homogeneidade são:

- Testes dos chorrilhos;
- Teste do desvio da média acumulada.

### **2.9.3. MÉTODO UTILIZADO PARA ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA E HOMOGENEIDADE**

A consistência e a homogeneidade são conceitos muito semelhantes. Por essa razão, pode dizer-se que ao fazer-se a verificação da consistência, estamos ao mesmo tempo a verificar a homogeneidade. Apesar de existirem testes estatísticos para a verificação tanto da consistência como da homogeneidade em separado, é de prática comum para a verificação da qualidade dos dados, em séries de dados hidrológicos, utilizar o método duplamente acumulado, proposto pela U.S. Geological Survey [37].

### **2.9.4. MÉTODO DUPLAMENTE ACUMULADO**

O método duplamente acumulado ou em inglês, Double Mass Curve (DMC), consiste na comparação da representação gráfica em sistema de coordenadas cartesianas. Onde no eixo das ordenadas são colocados os valores acumulados de precipitação anual do posto, a ser analisado, e no eixo das abcissas são colocados os valores médios de precipitação anual de um conjunto de postos udográficos auxiliares (pelo menos três postos auxiliares), situados nas imediações do posto a ser analisado. Este método admite que a representação gráfica de uma determinada série de valores acumulados comparados com uma outra série de valores também acumulados, durante o mesmo período de tempo, irá representar graficamente uma linha reta, desde que as séries sejam proporcionais. A partir do resultado gráfico, no caso de os pontos coincidirem sobre uma reta, então conclui-se que a série é consistente. Se o gráfico mostrar variação na inclinação, ou interrupções, então conclui-se que não existe consistência nos valores. No caso de análise de séries de precipitação este método assume que a relação entre as quantidades X e Y (séries de dados acumuladas), podem ser obtidas a partir da equação (2.12). [44].

$$Y = b * X \quad (2.12)$$

Onde:

- Y – Representa a série de dados acumuladas a ser analisada [mm];
- X – Representa a média acumulada das estações auxiliares para a análise [mm];
- b – Representa o declive da reta [-].

Para a representação gráfica do método duplamente acumulado, segundo Searcy em [44] alguns investigadores optam por começar a acumulação dos dados anuais desde o registo mais recente para o registo mais antigo, mas também pode ser feito o contrário optando por representar os dados desde o registo mais antigo para o mais recente, desta forma é possível adicionar os novos valores anuais.

Este método permite que, no caso em que as inconsistências detetadas não sejam causadas por razões meteorológicas, e se as séries forem extensas, iguais ou superiores a 25 anos, os valores das séries podem ser ajustados pelo coeficiente de ajuste determinado pela equação (2.13) [44].

$$P_a = \frac{b_a}{b_0} P_0 \quad (2.13)$$

Onde:

- $P_a$  – Representa o coeficiente de ajuste da precipitação [mm];
- $P_0$  – Representa a precipitação observada [mm];
- $b_a$  – Representa o declive do gráfico no tramo da reta que precisa de ser ajustado [-];
- $b_0$  – Representa o declive da reta no tramo da reta com consistência ou seja, em  $P_0$  [-].

## **2.10. MÉTODOS UTILIZADOS PARA O PREENCHIMENTO DE LACUNAS**

Existem situações que contribuem para a inviabilidade dos dados, tais como falhas existentes nas séries de registos, que podem ocorrer por diversas razões, ausência do observador para a recolha da informação, falhas nos mecanismos de registo, perda dos dados recolhidos durante um determinado período de tempo, por encerramento do posto udográfico, por mudança da localização do posto, entre outras situações. Estas falhas podem ser diárias, mensais ou até mesmo anuais. Usam-se métodos matemáticos, para colmatar estas lacunas, mas muitas vezes devido à grande falta de dados, não é possível corrigir as séries de forma a obter-se resultados viáveis. Os métodos frequentemente utilizados

para colmatar as lacunas dos dados de precipitação são de dois tipos. Por um lado tem-se os que usam dados de registos referentes ao próprio posto, e por outro lado os que fazem interpolação de dados utilizando dados de registo de postos nas imediações do posto com lacunas. Os métodos utilizados para o preenchimento das falhas são: método da média aritmética, o método de U.S. Weather Bureau e o método da regressão linear.

### 2.10.1. MÉTODO DA MÉDIA ARITMÉTICA

Um dos métodos mais básicos utilizado para o preenchimento de falhas é o Método da Média Aritmética, que consiste na determinação da precipitação ocorrida em uma determinada região com base na média dos valores registados por udógrafos nas imediações do udógrafo ao qual se pretende estimar a precipitação. O método da média aritmética é dado pela equação (2.14).

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (2.14)$$

Onde:

- $P_x$  – Representa o valor da precipitação que se pretende determinar [mm];
- $P_i$  – Representa o valor da precipitação em cada um dos postos [mm];
- $N$  – Representa o tamanho da amostra (número de postos) [-].

### 2.10.2. MÉTODO DE U. S. WEATHER BUREAU

O método United States Weather Bureau é o mais divulgado. Pode ser utilizado para a determinação das falhas em séries mensais ou anuais. Baseia-se na observação e ponderação de valores de precipitação de três postos auxiliares nas imediações do posto com lacunas, com características semelhantes, com dados de registos pertencentes à mesma época e sem lacunas coincidentes, do posto com falhas. O valor de precipitação, que se pretende determinar é obtido pelas relações entre a precipitação média anual (ou mensal), no posto em causa (com falhas), com a precipitação média anual (ou mensal) em cada um dos postos auxiliares [15]. Este método é dado pela equação (2.15).

$$P_x = \frac{1}{3} \left( \frac{\bar{P}}{\bar{P}_1} P_1 + \frac{\bar{P}}{\bar{P}_2} P_2 + \frac{\bar{P}}{\bar{P}_3} P_3 \right) \quad (2.15)$$



Onde:

- $P_x$  – Representa o valor da precipitação que se pretende determinar [mm];
- $P_1$  a  $P_3$  – Representam os valores de precipitação de três postos nas imediações (auxiliares) do posto com lacunas [mm];
- $\bar{P}$  – Representa a precipitação média mensal ou anual, do posto com falhas [mm];
- $\bar{P}_1$  a  $\bar{P}_3$  – Representam a média de cada um dos postos auxiliares do posto com lacunas [mm].

### 2.10.3. MÉTODO INVERSO DA DISTÂNCIA

O método do inverso da distância dado pela equação (2.16), consiste em ponderar as observações de diferentes postos udográficos vizinhos (auxiliares) pelo inverso das respetivas distâncias,  $r_i$  em [km], entre o posto auxiliar e o posto com lacunas. Este método é semelhante ao Método de U. S. Weather Bureau, diferenciando-se apenas por dar maior peso na ponderação dos cálculos, de entre os postos auxiliares, aos postos mais próximos ao posto com lacunas do que aos mais afastados, visto que para valores de  $r_i$  iguais, obtém-se a equação (2.15) a partir da equação (2.16) [37].

$$P = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}} \left( \frac{P_1}{\bar{P}_1} \times \frac{1}{r_1} + \frac{P_2}{\bar{P}_2} \times \frac{1}{r_2} + \frac{P_3}{\bar{P}_3} \times \frac{1}{r_3} \right) \quad (2.16)$$

### 2.10.4. MÉTODO DA REGRESSÃO LINEAR

Este método correlaciona os dados de uma série com lacunas, com os dados de um posto auxiliar sem lacunas coincidentes. Da correlação dos dois postos, determina qual a sua percentagem de associação, através do coeficiente de correlação  $r$ , que varia entre (-1 e 1). Geralmente correlaciona-se os valores do posto com lacunas com pelo menos três postos auxiliares, (correlação múltipla). Posteriormente determina-se o coeficiente de determinação  $R^2$ , para cada par de postos analisados (posto com lacunas com cada um dos postos auxiliares). O coeficiente de determinação é igual ao quadrado do coeficiente de correlação, varia entre 0 e 1, e indica qual a qualidade do ajuste, sendo que quanto mais próximo da unidade melhor o ajuste. É escolhido para a colmatação de lacunas o conjunto de postos que apresente o coeficiente de determinação mais elevado. A colmatação de lacunas é feita pela da equação (2.17).

$$Y_i = a * X_i + b \quad (2.17)$$

Onde:

- $Y_i$  – Representa os valores do mês ou ano em falta na série com lacunas [mm];
- $X_i$  – Representa os valores homólogos numa série sem lacunas da estação auxiliar [mm];
- $a$  e  $b$  – Representa os parâmetros determinados através do método dos mínimos quadrados [-].

Os parâmetros  $r$ ,  $a$ ,  $b$  e  $R^2$  podem ser determinados através das equações: (2.18); (2.19); (2.20); (2.21) respetivamente. Uma outra forma mais expedita de os determinar é recorrendo, por exemplo, a folhas de cálculo, obtendo-se uma representação gráfica de um diagrama de dispersão, mostrando a equação da reta e o coeficiente de correlação.

$$r = \frac{N * (\sum_{j=1}^N x_j * y_j) - (\sum_{j=1}^N y_j)}{\sqrt{N * (\sum_{j=1}^N x_j^2) - (\sum_{j=1}^N x_j)^2} - \sqrt{n * (\sum_{j=1}^N y_j^2) - (\sum_{j=1}^N y_j)^2}} \quad (2.18)$$

$$a = \frac{N * (\sum_{j=1}^N x_j * y_j) - (\sum_{j=1}^N x_j) * (\sum_{j=1}^N y_j)}{N * (\sum_{j=1}^N x_j^2) - (\sum_{j=1}^N x_j)^2} \quad (2.19)$$

$$b = \bar{y} - a * \bar{x} \quad (2.20)$$

$$R^2 = r^2 \quad (2.21)$$

Para as equações (2.18); (2.19); (2.20); (2.21) entende-se que:

- $N$  – Representa o tamanho da amostra [-];
- $y_j$  – Representa os valores de precipitação mensal ou anual da série  $y$  [mm];
- $x_j$  – Representa os valores de precipitação mensal ou anual da série  $x$  [mm];
- $\bar{y}$  – Representa a média da série  $y$  [mm];
- $\bar{x}$  – Representa a média da série  $x$  [mm].

## 2.11. DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE UDÓGRAFOS

Para o dimensionamento de uma rede udográfica não existe nenhuma fórmula que estabeleça qual a sua dimensão ideal. Para determinar o número de postos de registos a implantar numa determinada região, é necessário ter em conta a ocupação humana, a homogeneidade da distribuição espacial da precipitação na região e o rigor de dados que se pretende. Se o objetivo é apenas a recolha de dados para o conhecimento pluviométrico da região, basta uma rede de postos pouco densa, denominada de rede básica, em que os postos podem ser colocados em pontos específicos de maior interesse. Por outro lado,

se o objetivo é o estudo específico das bacias hidrográficas torna-se necessário uma rede mais condensada. A WMO fornece recomendações para o dimensionamento de uma rede udográfica, com base no clima, no tipo de relevo, acessibilidade dos locais, e na finalidade para que se pretende a rede. A projeção de uma rede udográfica começa pela projeção de uma rede inicial de udógrafos, denominada por rede mínima, a partir da qual após uma análise dos dados recolhidos deve-se passar para a projeção da rede ótima. Entende-se como rede ótima, a rede mais pequena possível de postos de registos que é necessária para obter as medições em toda a área desejada [15].

A rede de Udógrafos do LREC tem como objetivo a monitorização das ribeiras para prevenção de catástrofes, deve por isso ser uma rede udográfica condensada. Também pelas características do terreno e das bacias hidrográficas da Ilha, com declives bastantes acentuados e área das bacias muito pequenas, obriga a que as redes sejam mais condensadas, colocando-se por isso udógrafos relativamente próximos uns dos outros. Os udógrafos são colocados desde as cabeceiras das bacias até às regiões mais baixas, com variações de altitude entre udógrafos de 300 m. Da análise a parte da rede udográfica do LREC estudada (com 8 postos udográficos referentes as 3 principais bacias hidrográficas do Funchal), observa-se que a rede encontra-se bem dimensionada. É uma rede condensada, devido à envergadura das aluviões ocorridas na ilha, carece de conhecimento específico de diversas regiões. A rede está dimensionada desde a cabeceira das ribeiras até altitudes mais baixas.

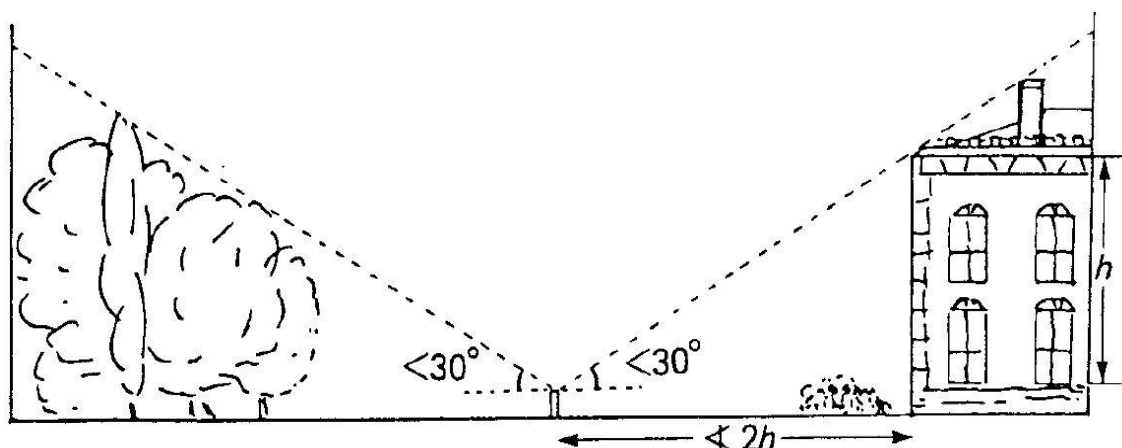
### **2.11.1. RECOMENDAÇÕES PARA A ESCOLHA DO LOCAL DE COLOCAÇÃO DOS UDÓGRAFOS**

Deve ser dada especial atenção à escolha do local de colocação dos udógrafos, sobretudo por forma a reduzir erros de medição, e em especial os erros provocados pelo vento. Segundo a WMO em [3] a localização perfeita de postos udográficos, para evitar os erros causados pelo vento, seria aquela em que a velocidade do vento que atinge a superfície recetora do aparelho seja a mínima possível. O que na realidade revela-se muito difícil de conseguir. Pode-se tomar algumas medidas de forma a reduzir alguns dos erros. A WMO em [14] fornece as seguintes recomendações para escolha do local:

- Colocar o equipamento em locais protegidos do vento em todas as direções, de preferência de forma natural, (por árvores, arbustos ou outros obstáculos). Contudo, esta proteção não pode estar muito perto do aparelho a fim de evitar turbulência do vento provocada pela mesma. É recomendado uma distância entre o topo do udógrafo e o topo do obstáculo tal que seja formado um ângulo de 30° ou inferior, entre a horizontal e a diagonal formada pela distância entre os topos do udógrafo e do obstáculo, como podemos observar na Figura 2.29, ou por outro lado de

forma mais simplista, pode ser considerado que a distância entre o udógrafo e o obstáculo seja duas vezes superior à altura do obstáculo, como representa a Figura 2.29.

- É aconselhado que a colocação dos udógrafos seja em locais sem declives acentuados, e encostas que estejam viradas na direção predominante do vento;
- O terreno em redor do posto deve ser coberto com relva, ou por cascalho;
- Deve ser colocado um perímetro vedado em torno do aparelho de forma a protegê-lo de animais ou vandalizações. A rede não deve ter uma altura superior à altura a que esteja colocado o udógrafo, para não interferir em demasia com o vento. A rede é colocada em torno do udógrafo perfazendo uma área de segurança com 2.5 a 3 m de comprimento em cada lado;
- Os aparelhos devem ser colocados em locais de fácil acesso e em uma zona que não venha a ser utilizada para outras finalidades futuras que possam perturbar o bom funcionamento do posto ou até implicar mudança do local do mesmo, uma vez que os udógrafos têm como objetivo recolher dados durante largas dezenas de anos.



**Figura 2.29 – Distância recomendada pela WMO entre udógrafos e obstáculos [37].**

De salientar que estas recomendações são de fácil aplicação para os udógrafos colocados nas cabeceiras das ribeiras. No entanto, nas regiões mais baixas, e onde existe maior ocupação humana, torna a escolha do local para a colocação dos equipamentos uma tarefa mais complicada, levando em alguns casos à impossibilidade de colocar os postos respeitando todas as recomendações anteriormente referidas.

### TRATAMENTO DE DADOS

*“Sob o ponto de vista estatístico, pode-se dizer que o objetivo de uma caracterização é descrever as características inerentes a uma população. Em outras palavras, hipóteses levantadas sobre uma dada população são confirmadas (ou negadas) por meio de um espaço amostral. Analogamente, em termos de caracterização climática, é desejado que as inferências realizadas sobre uma amostra (relativa, por exemplo, aos anos de 1961 a 1990) sejam válidas para um período futuro (1991 a 2020, por exemplo). Não há, entretanto, indicações exatas que determinem se as inferências realizadas com base em um período amostral, devem ser vistas apenas como características da amostra, ou podem ser extrapoladas para períodos futuros. Com isso, torna-se evidente a importância do estudo das variações paramétricas observadas em diferentes períodos amostrais” [45].*

Segundo Blain et al em [45], o comportamento dos fenómenos naturais, nomeadamente os fenómenos hidrológicos podem apenas ser interpretados de forma aproximada pelo padrão da variabilidade obtido através das amostras ou séries, recorrendo a métodos estatísticos, pois existem incertezas que as impedem de ser determinadas. Estas incertezas devem-se sobretudo a duas razões: Em primeiro lugar, deve-se à aleatoriedade natural da ocorrência destes fenómenos, uma vez que as ações dos fenómenos são para já pouco conhecidas. Em segundo lugar, deve-se às imperfeições dos equipamentos de medição que introduzem alterações que não podem ser previstas com exatidão.

#### 3.1. CONSTITUIÇÃO DA AMOSTRA

As séries de dados udográficos, para o tratamento e análise que será realizada neste trabalho foram facultadas pelo LREC. Inicialmente era uma amostra constituída por 9 postos udográficos, porém posteriormente um dos postos foi excluído, devido à elevada percentagem de lacunas. Os postos em estudo fazem parte da rede de udógrafos do LREC, e encontram-se distribuídos por 7 bacias hidrográficas. O estudo focar-se-á apenas nas 3 principais bacias do Funchal. A grande maioria dos postos em estudo, entraram em funcionamento no ano hidrológico 2004/2005, o que faz com que as séries de dados em estudo tenham no máximo dez anos, existindo, no entanto, postos que apresentam

séries com apenas 5 anos. Nos primeiros anos, os registos eram feitos em intervalos horários, tendo alguns anos mais tarde mudado para registos com intervalos de 10 minutos.

Segundo a WMO em [46], para o estudo da precipitação é necessário ter uma amostra suficientemente extensa de dados, preferencialmente de 30 anos ou superior, homogénea e consistente. Deve ser criada uma base de dados com os dados de precipitação, com toda a informação recolhida, tratada e analisada de forma ordenada. O objetivo da base de dados é:

- Manter a integridade dos dados permanentemente. Não só os dados tratados, como também os dados antes de serem tratados. Por razões de segurança convém ter acesso aos dados originais, também uma vez que com o avanço da tecnologia existem grandes possibilidades de no futuro serem desenvolvidas novas ferramentas através das quais os dados possam vir a ser reutilizados;
- Resumir o grande número de dados, para poderem ser analisados.
- Adicionar os novos registos que são recolhidos todos os anos.

Na ilha da Madeira o Projeto MonitorizaRibeira tem como objetivo a criação da sua própria base de dados, de forma a proceder ao tratamento e análise dos dados udográficos.

A organização das séries de precipitação é feita, geralmente, utilizando para cada ano hidrológico<sup>4</sup> o valor da precipitação, agrupando estes em vários intervalos, determinando as médias e os máximos para cada intervalo de tempo de precipitação. Estes intervalos de precipitação podem ser:

- De 10 minutos;
- Horários (Ph);
- Diários (Pd);
- Mensais (Pm);
- Anuais (Pa).

Posteriormente estes valores são reorganizados, a WMO em [46] recomenda a organização da amostra utilizando métodos de resumo para agrupar os valores, em três categorias:

- Medidas de tendência central;
- Medidas de dispersão;
- Medidas de assimetria.

---

<sup>4</sup> Ano Hidrológico em Portugal é o período de tempo compreendido entre o dia 1 de outubro e 30 de setembro.

Para a representação e análise de dados de precipitação é de prática comum recorrer a gráficos em função do tempo. Estes podem apresentar elevada variação o que torna difícil a compreensão e leitura do mesmo. Uma vez que os dados dos registos de precipitação podem dar-se de forma gradual, abrupta ou ambas, torna necessário evidenciar estas alterações, recorrendo aos métodos de resumo. No subcapítulo 3.6. Análise estatística, serão abordados os métodos de resumo referidos.

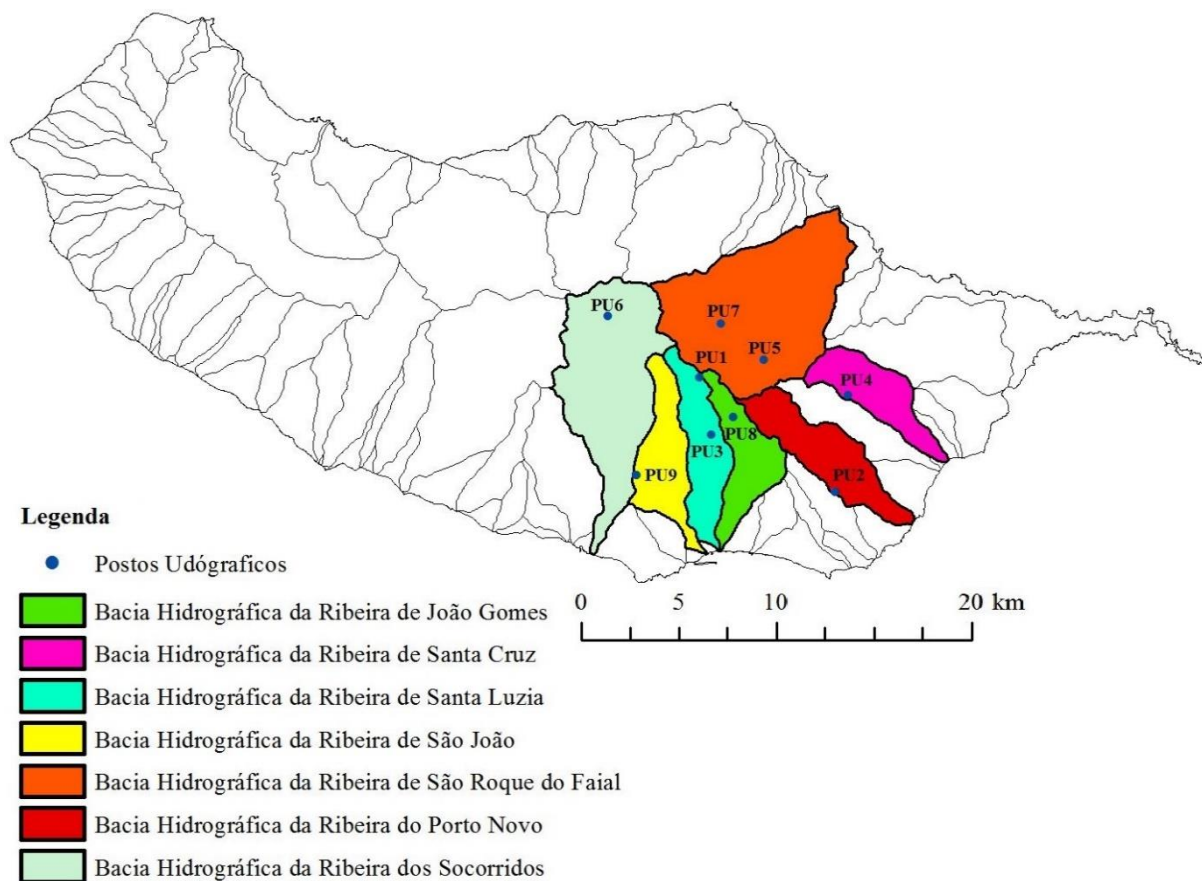
### 3.2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo relaciona-se com as três principais bacias hidrográficas do Funchal, bacia da ribeira de João Gomes, da ribeira de Santa Luzia e da ribeira de São João. Contudo, os postos udográficos em estudo encontram-se distribuídos por sete diferentes bacias hidrográficas. Os postos udográficos encontram-se localizados a diferentes altitudes, que variam entre os 500 e os 1500 m. Como já referido anteriormente as características de cada um dos nove posto udográficos em estudo podem ser observadas no Anexo A1 – Características dos postos udográficos, onde entre a Tabela A1. 1 e a Tabela A1. 9, para cada posto está especificado: nome, número de série, tipo de posto, entidade responsável, estado, ano de entrada em funcionamento, período de registo horário, ano a partir do qual apresenta registos em intervalos de 10 minutos, bacia hidrográfica, concelho, altitude e coordenadas em X e Y.

Na Tabela 3.1, estão as bacias hidrográficas e os correspondentes postos udográficos nelas situadas, com o respetivo nome abreviado para cada posto udográfico (PU). Na Figura 3.1 encontra-se a localização em mapa, elaborado em software ArcGIS versão 10.4, dos mesmos postos e as respetivas bacias hidrográficas a que pertencem.

**Tabela 3.1 – Bacias hidrográficas e os postos udográficos correspondentes.**

| Bacia hidrográfica            | Posto udográfico   | Abreviação dos postos udográficos |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Ribeira de João Gomes         | PEF                | PU8                               |
| Ribeira de Santa Cruz         | Casa Velha         | PU4                               |
| Ribeira de Santa Luzia        | Achada Grande      | PU1                               |
|                               | Casa do Barreiro   | PU3                               |
| Ribeira de São João           | Trapiche           | PU9                               |
| Ribeira de São Roque do Faial | Chão das Feiteiras | PU5                               |
|                               | Fajã da Nogueira   | PU7                               |
| Ribeira do Porto Novo         | Camacha            | PU2                               |
| Ribeira dos Socorridos        | Curral das Freiras | PU6                               |



**Figura 3.1 – Localização dos postos udográficos e respectivas bacias hidrográficas.**

### 3.3. ANÁLISE PRELIMINAR DAS SÉRIES DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO

O tratamento de dados consiste em organizar todo o conjunto de valores das séries para que possam ser devidamente analisados. Os dados recolhidos diretamente dos udógrafos, vêm em formato TXT, onde existem três colunas de dados, onde é indicado a data, a hora, e o número de balanceamentos dos recetáculos, para cada intervalo de registos (intervalos de 10 minutos, ou intervalos horários). Estes ficheiros por norma apresentam registos de períodos que rondam os três meses, isto porque a capacidade de armazenamento do equipamento não permite períodos muito superiores, sendo que se não se fizer a recolha dos dados o equipamento regista novos dados e elimina os precedentes.

O primeiro passo para o tratamento dos dados foi criar uma folha de cálculo Excel onde é possível introduzir os dados de forma a poder organizar os mesmos, obtendo valores de precipitação em milímetros, para intervalos de 10 minutos (quando aplicável), e em intervalos horários, diários, mensais e anuais. Também são determinados os valores médios, os máximos e o número de registos em branco, para cada uma das séries em cada ano hidrológico. A título de exemplo a Figura 3.2 mostra uma das



folhas de cálculo para um dos postos em um determinado ano hidrológico, utilizada para a determinação dos parâmetros de precipitação de cada um dos postos.

|       |   |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
|-------|---|------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---|--|---|
| 1     | LABORATORIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL                |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
| 2     | ACHADA GRANDE 2011/2012                                 |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
| 3     | Tipo de Estação   | Estado     | Nº de Série | Parametro de Medição        | Unidades                     | Intervalo Mínimo de Registro | Entidade Responsavel Pelos Dados Fornecidos | Entidade Responsavel Pelo Trabalho Academico | Início do Ano Hidrológico Correspondente (DD/MM/AA) |
| 4     | Udográfica  | Ativa      | 2018051     | Precipitação                | (mm)                         | 10 min.                      | LREC  | Universidade da Madeira                      | 01/10/2011  |
| 5     | Conselho  | Freguesia  | Bacia       | Altitude (m)                | Coordenada X (m)             | Coordenada Y (m)             | Longitude (ºW)                              | Latitude (ºN)                                | Entrada em Funcionamento                            |
| 6     |   |            |             |                             |                              |                              |   |  | 01/10/2004  |
| 7     | Elaborado Por: Jorge Ramos                              |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
| 8     |   |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
| 9     |   |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
| 10    |   |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |
| 11    | Valores de Referência Para Ajudar na Entrada de Dados   |            |             | Entrada de Dados            |                              |                              | Precipitação 10min (mm)                     | Precipitação horaria (mm)                    | Precipitação Mensal (mm)                            |
| 12    | Meses   | DD/MM/AA   | Horas       | Data de Registro (DD/MM/AA) | Hora de Registro (GMT+00:00) | Nº de Basculamentos          | Precipitação Diária (mm)                    |  | Precipitação Anual (mm)                             |
| 13    | outubro   | 01/10/2011 | 00:10:00    | 01/10/2011                  | 00:10:00                     | 0                            | 0,0   |  |   |
| 14    | outubro   | 01/10/2011 | 00:20:00    | 01/10/2011                  | 00:20:00                     | 0                            | 0,0   |  |   |
| 15    | outubro   | 01/10/2011 | 00:30:00    | 01/10/2011                  | 00:30:00                     | 0                            | 0,0   |  |   |
| 52713 | setembro  | 30/09/2012 | 23:30:00    | 30/09/2012                  | 23:30:00                     | 0                            | 0,0   |  |   |
| 52714 | setembro  | 30/09/2012 | 23:40:00    | 30/09/2012                  | 23:40:00                     | 0                            | 0,0   |  |   |
| 52715 | setembro  | 30/09/2012 | 23:50:00    | ATENÇÃO                     |                              |                              |   |  |   |
| 52716 | setembro  | 01/10/2012 | 00:00:00    | ATENÇÃO                     | 01/10/2012                   | 00:00:01                     | 0   |  |   |
| 52717 | Número de Celulas Em Branco Em Intervalos de 10 minutos |            |             | 1                           | 1                            | 1                            | Total Acumulado (mm)                        | 1033,0                                       | 1033,0  |
| 52718 | Dias Sem Dados na Serie (aproximadamente)               |            |             | 0,0                         | 0,0                          | 0,0                          | Média (mm)                                  | 0,02   | 86,1  |
| 52719 | NOTAS RELEVANTES SOBRE A INSERÇÃO DE DADOS              |            |             |                             |                              |                              | Máximos (mm)                                | Em 10 min. 5,6                               | Em 1 mês 258,0                                      |
| 52720 |   |            |             |                             |                              |                              | Número de Valores                           | 52703  | 8783  |
| 52721 |   |            |             |                             |                              |                              |   | 365  | 12  |
| 52722 |   |            |             |                             |                              |                              |   |  |   |

Figura 3.2 – Exemplo da folha de cálculo para organização dos dados de precipitação.

Ao introduzir os dados recolhidos pelo udógrafo para a folha de cálculo, no separador “Entrada de Dados”, esta deteta e contabiliza os dados que faltam, destacando a amarelo as zonas onde deviam estar os dados, como se pode observar na Figura 3.2. A folha de cálculo deteta também os registos que possam estar na posição errada, destacando-os a amarelo, com a mensagem “ATENÇÃO”, como mostra a Figura 3.2. Na folha de cálculo elaborada neste trabalho os valores podem ser observados também em forma de tabela, sendo que desta forma os dados são facilmente perceptíveis.

Posteriormente também foram criados na mesma folha de cálculo, outros separadores, como é o caso do separador denominado de “Disposição em Colunas”, de forma a poder organizar os registos de forma mais perceptível. Neste separador, “Disposição em Colunas”, foram colocados em diferentes colunas, todos os valores da precipitação, em intervalos de, 10 minutos, horários, diários, mensais e anuais, de forma a ser possível representar estes mesmos valores, em gráficos.

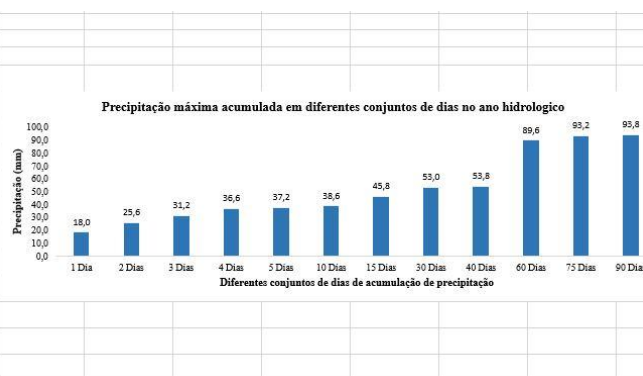
Relativamente à mesma folha de cálculo, foram criados diferentes separadores: “P (10min)”, “P (hora)”, “P (dia)”, onde os valores referidos anteriormente no separador “disposição em Colunas”, foram reorganizados em forma de tabela, destacando em diferentes tonalidades de cores, diferentes intervalos de precipitação ocorridos. Na Figura 3.3 encontra-se representado, a título de exemplo, a tabela para a precipitação diária “P (dia)”, de um ano hidrológico para um dos postos. A partir deste separador, são retirados os valores da precipitação mensal necessários para colmatação de lacunas.

Ainda na mesma folha de cálculo foi criado um separador denominado de “Precipitação Acumulada” o qual a partir dos dados de precipitação diária pertencente a um ano hidrológico, é criada uma tabela onde é apresentada as datas relativas a diferentes intervalos de dias em que a precipitação foi mais elevada, e os respetivos valores de precipitação. Os intervalos de dias de precipitação acumulados foram para conjuntos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 40, 60, 75 e 90 dias. Tal como mostra a Figura 3.4, o resultado é apresentado em forma de tabela, e também em forma gráfica, onde é mais facilmente perceptível a maior ou menor variação da precipitação em cada conjunto de dias. O objetivo desta tabela é relacionar a precipitação máxima acumulada em cada um dos conjuntos de dias mencionados, em um determinado ano, com valores de precipitação máxima acumulada nos mesmos conjuntos de dia, com um ano no qual tenha ocorrido uma aluvião, e analisar a relação entre a precipitação que desencadeia um determinado evento, aluvião, e a ocorrência de precipitação nos dias antecedentes.

| PRECIPITAÇÃO DIÁRIA (Pd)                                  |         |          |          |         |           |       |       |      |       |       |        |          |
|---|---------|----------|----------|---------|-----------|-------|-------|------|-------|-------|--------|----------|
| Dias  | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maio | Junho | Julho | Agosto | Setembro |
| 1   | 0,0     | 0,0      | 9,0      | 0,4     | 12,0      | 7,6   | 0,0   | 2,6  | 0,0   | 0,0   | 0,6    | 0,0      |
| 2   | 0,0     | 0,4      | 158,6    | 0,4     | 0,4       | 74,4  | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,4    | 0,0      |
| 3   | 0,0     | 2,0      | 255,2    | 1,4     | 0,2       | 85,8  | 0,0   | 0,6  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 4   | 0,0     | 30,6     | 289,0    | 1,6     | 0,8       | 68,8  | 0,0   | 0,2  | 0,0   | 3,2   | 0,0    | 0,0      |
| 5   | 0,0     | 9,0      | 212,2    | 0,8     | 4,6       | 4,8   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,2   | 0,0    | 0,0      |
| 6   | 0,0     | 14,0     | 111,4    | 0,2     | 31,4      | 1,6   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 7   | 35,6    | 2,8      | 25,0     | 0,2     | 40,4      | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 8   | 0,0     | 0,4      | 22,2     | 23,6    | 49,2      | 4,4   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,2      |
| 9   | 1,0     | 18,8     | 14,0     | 12,6    | 25,2      | 0,0   | 0,0   | 18,0 | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 10  | 0,0     | 8,2      | 24,0     |         | 8,2       | 0,4   | 0,0   | 47,4 | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 2,8      |
| 11  | 0,4     | 6,2      | 10,0     |         | 18,6      | 0,2   | 0,0   | 5,2  | 0,0   | 0,0   | 0,4    | 0,2      |
| 12  | 0,8     | 20,6     | 51,8     |         | 4,6       | 0,6   | 0,0   | 0,0  | 0,4   | 0,0   | 0,2    | 1,6      |
| 13  | 6,0     | 3,4      | 43,8     |         | 27,8      | 0,2   | 0,0   | 2,0  | 0,2   | 0,0   | 0,4    | 1,4      |
| 14  | 2,6     | 0,4      | 70,8     |         | 117,4     | 0,0   | 0,0   | 0,2  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,2      |
| 15  | 0,2     | 4,6      | 0,6      |         | 1,4       | 0,0   | 0,0   | 0,4  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 16  | 0,2     | 5,0      | 7,8      |         | 1,2       | 0,0   | 0,0   | 0,2  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 17  | 71,4    | 0,4      | 2,0      |         | 10,8      | 0,0   | 0,0   | 0,6  | 0,0   | 0,0   | 0,2    | 5,2      |
| 18  | 134,8   | 0,6      | 1,2      |         | 1,8       | 0,2   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,2   | 1,6    | 5,2      |
| 19  | 83,4    | 0,6      | 0,4      |         | 2,8       | 0,4   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 1,4    | 0,2      |
| 20  | 3,8     | 3,4      | 4,0      |         | 0,6       | 6,2   | 0,0   | 0,0  | 4,4   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 21  | 0,0     | 0,2      | 25,2     |         | 9,8       | 17,6  | 0,0   | 0,0  | 2,8   | 0,0   | 0,0    | 2,6      |
| 22  | 0,2     | 0,0      | 29,4     |         | 2,8       | 14,2  | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,0      |
| 23  | 0,2     | 0,0      | 7,4      |         | 94,2      | 21,0  | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,2      |
| 24  | 0,0     | 0,0      | 2,2      |         | 5,6       | 17,0  | 0,4   | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0    | 0,2      |
| 25  | 0,0     | 0,2      | 11,6     |         | 7,6       | 11,2  | 0,4   |      | 0,0   | 0,0   |        | 0,2      |
| 26  | 0,0     | 0,2      | 28,4     |         | 160,4     | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,0   | 11,6  | 0,0    | 1,0      |
| 27  | 21,4    | 6,0      | 37,8     |         | 56,6      | 0,0   | 0,0   | 1,0  | 0,0   | 0,2   | 0,4    | 0,4      |
| 28  | 0,4     | 20,4     | 14,2     | 9,0     | 53,6      | 0,0   | 0,0   | 7,6  | 0,2   | 0,0   | 0,8    | 0,2      |
| 29  | 17,8    | 55,4     | 8,0      | 7,0     |           | 0,0   | 0,0   | 0,6  | 0,4   | 0,0   | 0,2    | 0,0      |
| 30  | 0,0     | 46,8     | 3,8      | 11,8    |           | 0,0   | 0,0   | 0,4  | 0,0   | 5,4   | 0,0    | 0,0      |
| 31  | 0,2     |          | 0,0      | 25,8    |           | 0,0   |       | 0,2  |       | 1,6   | 0,0    |          |
| Total Acumulado   | 380,2   | 260,6    | 1481,0   | 94,8    | 750,0     | 336,6 | 0,8   | 87,2 | 8,4   | 22,4  | 6,6    | 21,8     |
| Média (mm)  | 12,7    | 8,7      | 47,8     | 7,3     | 26,8      | 10,9  | 0,0   | 2,9  | 0,3   | 0,7   | 0,2    | 0,7      |
| Máximo Diário   | 134,8   | 55,4     | 289,0    | 25,8    | 160,4     | 85,8  | 0,4   | 47,4 | 4,4   | 11,6  | 1,6    | 5,2      |
| Nº de Dados   | 0       | 0        | 0        | 18      | 0         | 0     | 0     | 1    | 0     | 0     | 1      | 0        |
| Precipitação Diária Máxima Anual (mm)                     |         |          |          |         | 289,0     |       |       |      |       |       |        |          |
| Total de Precipitação Acumulada no Ano (mm)               |         |          |          |         | 3450,6    |       |       |      |       |       |        |          |
| Número de Dias com Precipitação INFERIORES a 0,2 mm       |         |          |          |         | 153       |       |       |      |       |       |        |          |
| Número de Dias com Precipitação ENTRE 0,2 e 5,0 mm        |         |          |          |         | 110       |       |       |      |       |       |        |          |
| Número de Dias com Precipitação ENTRE 5,1 e 50,0 mm       |         |          |          |         | 63        |       |       |      |       |       |        |          |
| Número de Dias com Precipitação SUPERIORES a 50,0 mm      |         |          |          |         | 19        |       |       |      |       |       |        |          |
| Número de Dias com Precipitação IGUAL E SUPERIOR a 0,2 mm |         |          |          |         | 192       |       |       |      |       |       |        |          |
| Número de Valores de Registos                             |         |          |          |         | 345       |       |       |      |       |       |        |          |
| Número Total de Dias Com Valores em Falta                 |         |          |          |         | 20        |       |       |      |       |       |        |          |

Figura 3.3 – Folha de cálculo com os valores de P (dia) disposto em tabela.

| Intervalos Considerados | Data do Intervalo Onde Ocorreu Maior Precipitação Acumulada |       |            | Precipitação Acumulada (mm) |
|-------------------------|---|-------|------------|-----------------------------|
| 1 Dia                   | 10/05/2005  | Desde | 10/05/2005 | 18,0                        |
| 2 Dias                  | 24/03/2005  | Desde | 23/03/2005 | 25,6                        |
| 3 Dias                  | 24/03/2005  | Desde | 21/03/2005 | 31,2                        |
| 4 Dias                  | 24/03/2005  | Desde | 20/03/2005 | 36,6                        |
| 5 Dias                  | 24/03/2005  | Desde | 19/03/2005 | 37,2                        |
| 10 Dias                 | 25/03/2005  | Desde | 15/03/2005 | 38,6                        |
| 15 Dias                 | 01/04/2005  | Desde | 17/03/2005 | 45,8                        |
| 30 Dias                 | 16/04/2005  | Desde | 17/03/2005 | 53,0                        |
| 40 Dias                 | 16/04/2005  | Desde | 07/03/2005 | 53,8                        |
| 60 Dias                 | 16/05/2005  | Desde | 17/03/2005 | 89,6                        |
| 75 Dias                 | 28/05/2005  | Desde | 14/03/2005 | 93,2                        |
| 90 Dias                 | 28/05/2005  | Desde | 27/02/2005 | 93,8                        |



**Figura 3.4 – Máxima precipitação acumulada para diferentes conjuntos de dias.**

Foram elaboradas outras três folhas de cálculo com as formulações necessárias para a colmatação de lacunas, para a análise de qualidade e para o tratamento estatístico dos dados. A partir da folha de cálculo onde foi elaborada a análise estatística, foi possível criar gráficos para cada posto udográfico relativamente a todos os anos para cada um dos meses, permitindo assim observar a variação da precipitação de cada mês ao longo dos anos de registo.

Na obtenção de dados pluviométricos deve-se contar sempre com erros que podem ocorrer por diversas razões. Contudo, o equipamento muitas vezes apresenta alguns erros que são facilmente perceptíveis após uma análise preliminar e devem ser excluídos da série de dados [47]. Estes erros são:

- Valores exageradamente altos num curto espaço de tempo;
- Valores repetitivos durante longos períodos de registos;
- Valores registados em datas ou horas não correspondentes com a sequência normal, ou por repetição dos valores.

Nas séries de dados estudadas, existiram alguns casos de valores que foram excluídos, porque influenciavam os dados analisados de forma errónea. A título de exemplo, um dos casos ocorreu no posto Chão da Feiteiras no ano hidrológico 2011/2012 onde verificou-se que no dia 13/06/2012 entre as 15:40h e as 17:10h o equipamento registou 6407 balanceamentos que correspondem a 1281 mm de precipitação. Estes registos foram excluídos, por se tratar de valores demasiados altos num curto período de tempo, sobretudo tendo ocorrido no mês de junho, e também pelo facto da média de precipitação anual do posto em causa ser de 1820 mm, um valor demasiado próximo do que ocorreu em apenas 1:30h. Outro exemplo de exclusão de dados ocorreu no posto da Camacha no ano hidrológico 2004/2005, no qual, no período compreendido entre o dia 01/10/2004 e o dia 09/03/2005 obtiveram-se registos horários sempre com o valor de 61 balanceamento. Também foram encontradas em diversas séries, erros, por repetição dos dados. Ou seja em alguns casos o equipamento apresentou os dados correspondentes a um determinado intervalo de tempo mais do que uma vez.

Após a análise preliminar dos dados das séries, é necessário perceber qual a percentagem de dias sem registos em cada um dos postos udoográficos. Dessa forma, é possível determinar se devemos proceder à exclusão de alguma série de dados ou não. De salientar que não existe nenhuma regra que indique qual a percentagem de valores a partir dos quais deve-se excluir a série, varia consoante o objetivo e a finalidade a que se destina o estudo, bem como da qualidade da própria série.

Na Tabela 3.2, observa-se que em alguns casos existe uma percentagem de lacunas muito baixa, como é o caso dos postos Achada Grande, Casa Velha (P.F) e Trapiche com 2.82, 2.08 e 0.16%, respetivamente. O caso do posto PEF (Parque Ecológico do Funchal) apresenta uma percentagem bastante elevada de lacunas com 43.12%, pelo que será excluído da análise de dados. Todos os restantes postos, apesar de terem percentagens de lacunas elevadas, serão mantidos no estudo.

**Tabela 3.2 – Percentagem de dias sem registos em cada posto udoográfico.**

| <b>Estação</b>     | <b>Período analisado</b> | <b>Percentagem de dias sem registos</b> |
|--------------------|--------------------------|---|
| Achada Grande      | 2004/2005 – 2013/2014    | 2.82%                                   |
| Camacha            | 2004/2005 – 2013/2014    | 13.40%                                  |
| Casa Barreiro      | 2004/2005 – 2013/2014    | 20.00%                                  |
| Casa Velha (P.F)   | 2009/2010 – 2013/2014    | 2.08%                                   |
| Chão das Feiteiras | 2007/2008 – 2013/2014    | 16.71%                                  |
| Curral das Freiras | 2004/2005 – 2013/2014    | 11.48%                                  |
| Fajã da Nogueira   | 2007/2008 – 2013/2014    | 16.87%                                  |
| PEF                | 2009/2010 – 2013/2014    | 43.12%                                  |
| Trapiche           | 2004/2005 – 2013/2014    | 0.16%                                   |

### 3.4. PREENCHIMENTO DE LACUNAS DOS POSTOS UDOGRÁFICOS EM ESTUDO

O preenchimento de lacunas das séries de dados foi feito para séries de dados mensais. Inicialmente o método escolhido foi o método da regressão linear, porém o método foi alterado para o método da U.S. Weather Bureau. Isto porque, em alguns casos o grau de correlação de dados era demasiado baixo, chegando a ser inferior a 10%. Sendo que dos 59 registos mensais que foram submetidos ao processo de colmatagem de lacunas, cerca de 31% tiveram um coeficiente de correlação igual ou superior a 95%. 17% obtiveram uma correlação entre os 85 e 94%. 20% obtiveram uma correlação entre 70 e 84%. Finalmente 32% obtiveram uma correlação inferior a 70%, dos quais 15% obtiveram um grau de correlação inferior a 30%.

Segundo Portalés em [48] o nível de correlação deve diminuir de uma análise anual em relação a uma análise mensal. Para uma análise mensal valores com correlação superiores a 95% são muito bons, superiores aos 85% são bons, o autor refere que dados com correlação superiores a 70% são aceitáveis.

O procedimento para o preenchimento de lacunas utilizando o método da U.S Weather Bureau seguiu os seguintes passos:

1. Identificação para todas as séries de dados de todos os postos udográficos e para todos os anos, quais os meses em que não houve registros. Uma vez que nem todos os meses tinham falha de registros diários, imediatamente desde o início até o fim do mês foi necessário analisar cada um dos meses em separado. Por um lado, nos casos em que um determinado mês tinha lacunas diárias em quase todos os dias do mês, tendo registros apenas em três dias ou menos, esses dias com registros foram eliminados da série, obtendo-se desta forma um mês completo sem registros. Por outro lado, foram ignorados os meses em que continham registros em quase todo o mês com exceção de três dias sem registros, admitindo que o mês estava completo.
2. Identificar para cada estação com lacunas, quais as três estações mais próximas, com o intuito de funcionarem como estações auxiliares na colmatação de lacunas;
3. Verificação dos postos auxiliares escolhidos no ponto anterior, averiguando que não apresentam uma variação de altitude para com o posto a ser tratado superior a 300 metros (nem sempre foi possível);
4. Verificação de que os postos auxiliares escolhidos não apresentam lacunas, concernentes à mesma data das lacunas do posto a ser tratado, Tabela 3.3;
5. Elaboração de uma folha de cálculo para determinar as lacunas de precipitações mensais, através do método escolhido.

Na Tabela 3.3 encontram-se agrupados os postos auxiliares utilizados para a colmatação de lacunas para cada um dos postos. Bem como os postos auxiliares para a análise de qualidade dos dados que será abordada mais à frente no subcapítulo 3.5 – Análise de qualidade dos dados dos postos em estudo.

**Tabela 3.3 – Postos auxiliares utilizados para a colmatação de lacunas e análise de qualidade dos dados para cada posto analisado.**

| <b>Postos com lacunas</b> | <b>Postos auxiliares</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| Achada Grande             | Casa do Barreiro         |
|                           | Chão das Feiteiras       |
|                           | Fajã da Nogueira         |
| Camacha                   | Casa do Barreiro         |
|                           | Casa Velha               |
|                           | Trapiche                 |
| Casa do Barreiro          | Achada Grande            |
|                           | Chão das Feiteiras       |
|                           | Trapiche                 |
| Casa Velha                | Camacha                  |
|                           | Casa do Barreiro         |
|                           | Chão das Feiteiras       |

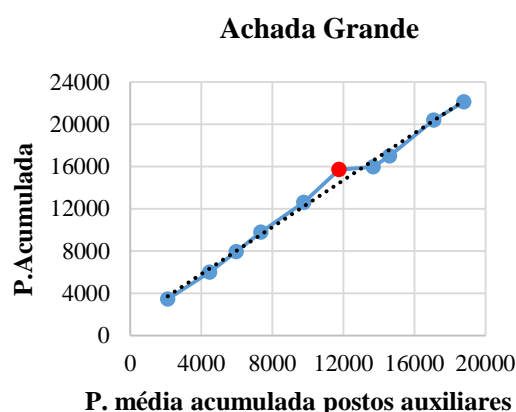
| Postos com lacunas | Postos auxiliares  |
|--------------------|--------------------|
| Chão das Feiteiras | Casa do Barreiro   |
|                    | Casa velha         |
|                    | Fajã da Nogueira   |
| Curral das Freiras | Achada Grande      |
|                    | Fajã da Nogueira   |
|                    | Trapiche           |
| Fajã da Nogueira   | Achada Grande      |
|                    | Chão das Feiteiras |
|                    | Curral das Freiras |

### 3.5. ANÁLISE DE QUALIDADE DOS DADOS DOS POSTOS EM ESTUDO

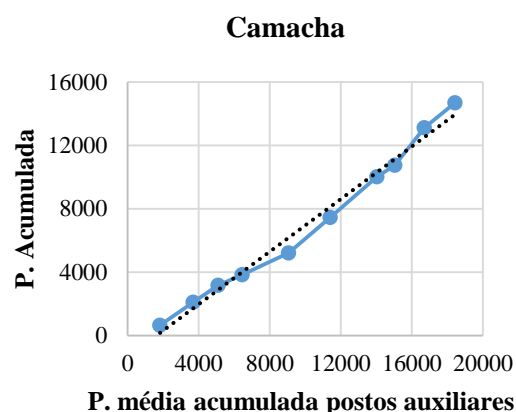
A verificação da homogeneidade e consistência dos dados foi efetuada através do método Duplamente Acumulado. Para a realização do método, recorrendo ao Excel, foram seguidos os seguintes passos:

1. Tabelar a precipitação anual do posto com lacunas, em ordem crescente de anos.
2. Determinar a precipitação anual acumulada da estação com lacunas;
3. Escolha de três postos auxiliares, nas imediações do posto com lacunas. Foram utilizadas como postos udográficos auxiliares, os indicados na Tabela 3.3;
4. Tabelar a precipitação anual de cada um dos postos auxiliares;
5. Determinar a precipitação média anual dos três postos auxiliares em cada ano hidrológico;
6. Determinar a precipitação média anual acumulada dos postos auxiliares;
7. Representar graficamente as acumulações descritas nos pontos 2 e 6;
8. Análise dos dados.

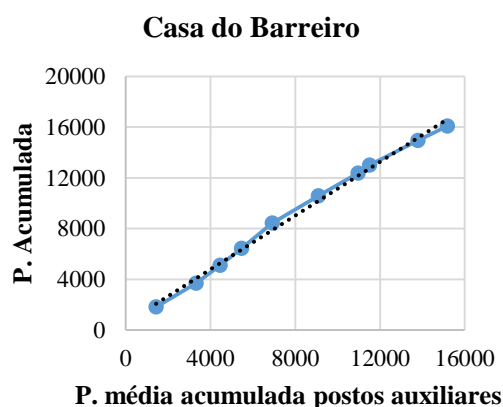
De seguida apresenta-se entre a Figura 3.5 e a Figura 3.12 os gráficos referentes à análise de qualidade de cada um dos postos. Onde cada ponto azul representa a interseção da precipitação acumulada no posto a ser analisado com a precipitação média acumulada dos postos auxiliares para cada ano hidrológico. A linha contínua azul representa a ligação entre cada um dos pontos, e a linha interrompida, representa a reta que melhor se adapta a nuvem de pontos. Os dados utilizados para a construção destes gráficos encontram-se no Anexo A4 – Dados para realização do método duplamente acumulado.



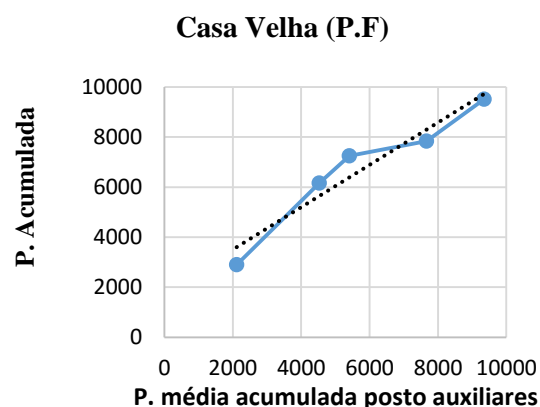
**Figura 3.5 – Análise de qualidade do posto Achada Grande pelo método duplamente acumulado.**



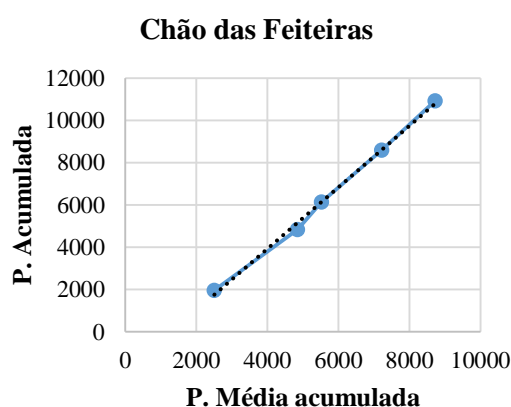
**Figura 3.6 – Análise de qualidade do posto Camacha, pelo método duplamente acumulado.**



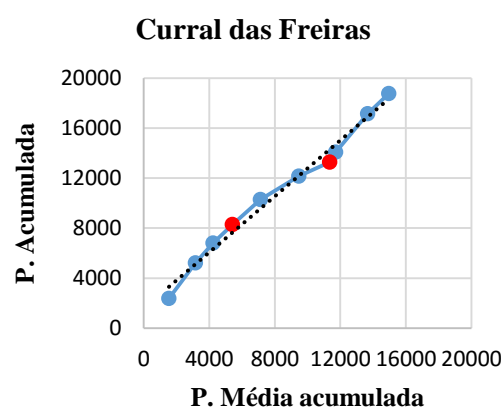
**Figura 3.7 – Análise de qualidade do posto Casa do Barreiro pelo método duplamente acumulado.**



**Figura 3.8 – Análise de qualidade do posto Casa Velha método duplamente acumulado.**

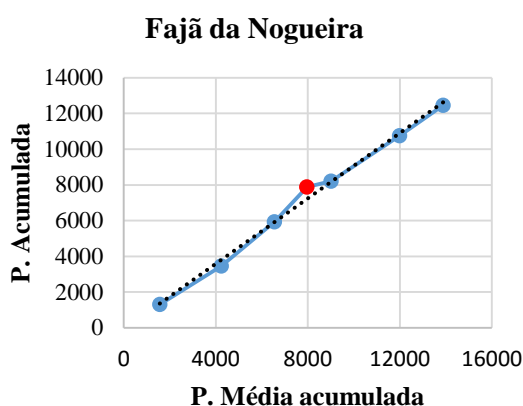


**Figura 3.9 – Análise de qualidade do posto Chão das Feiteiras pelo método duplamente acumulado.**

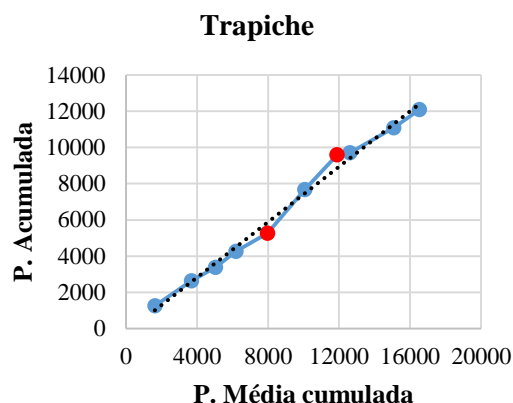


**Figura 3.10 – Análise de qualidade do posto Curral das Freiras pelo método duplamente acumulado.**





**Figura 3.11 – Análise de qualidade do posto Fajã da Nogueira pelo método duplamente acumulado.**



**Figura 3.12 – Análise de qualidade do posto Trapiche pelo método duplamente acumulado.**

Pela análise do gráfico da Figura 3.5, referente ao posto udrográfico Achada Grande, observa-se que os pontos formam quase na totalidade uma linha reta, com exceção para o ponto destacado vermelho, que sobressai da reta. Este ponto representa a acumulação dos valores com os do ano hidrológico de 2009/2010, que foi um ano especialmente chuvoso, do qual resultou uma aluvião. Para a análise de qualidade deste posto foram utilizados apenas os postos auxiliares Casa do Barreiro e Curral das Freiras, o posto auxiliar Chão das Feiteiras foi excluído uma vez que apresentava uma série de registos inferior à do posto em análise.

Na Figura 3.6, alusiva ao posto Camacha, observa-se que existe um ligeiro desvio, não muito acentuado, o que porém pode significar falta de homogeneidade da série de dados. De salientar também que as séries de dados utilizadas para esta análise têm no máximo 10 anos, muito inferior aos 25 anos recomendados para a utilização do método. O posto auxiliar, Casa Velha, foi excluído desta análise por ter uma série de dados inferiores aos do posto da Camacha.

Na Figura 3.7, referente ao posto Casa do Barreiro, os dados obtidos apresentam uma reta, com uma ligeira variação no seu centro, no valor referente ao ano hidrológico 2009/2010 que como já referido anteriormente, choveu acima da média.

O posto Casa Velha, representado pelo gráfico da Figura 3.8, apresenta elevada variação nos pontos, não perfazendo uma reta como o pretendido para dados homogêneos, mas isto pode dever-se ao facto do posto ter apenas 5 anos de dados de registos.

O posto Chão das Feiteiras, representado pelo gráfico da Figura 3.9, apresenta os valores bem distribuídos sobre uma reta, no entanto, esta estação tem apenas 5 anos de registo.



A Figura 3.10 apresenta um gráfico referente ao posto Curral das Freiras, onde pode-se observar diversas mudanças no seu declive, nos pontos destacados a vermelho. Estas mudanças de declive sugerem falta de homogeneidade dos dados, pode ter a ver pelo facto de ter havido uma mudança do local do posto udográfico. Esta dispersão de dados indica que não existe nenhuma tendência clara. De salientar também que para esta análise foram utilizados apenas dois postos auxiliares, sendo que o posto auxiliar Fajã da Nogueira foi excluído por apresentar uma série de dados inferiores à do posto a ser analisado.

A Figura 3.11 exhibe os dados do posto Fajã da Nogueira, os dados na sua grande maioria encontram-se alinhados, o que evidencia, uma série de dados homogêneos. Contudo, existe um valor (ponto destacado a vermelho), que sobressai dos restantes valores, este valor é referente ao ano hidrológico 2010/2011. De salientar que, a série de dados deste posto tem apenas 7 anos de registos.

A Figura 3.12, exhibe o posto udográfico Trapiche, a representação dos dados mostram duas mudanças de declives, (pelos pontos destacados a vermelho). Estas mudanças ocorreram nos anos hidrológicos 2008/2009 e 2010/2011, evidenciando falta de homogeneidade dos dados.

### 3.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Devido à elevada quantidade de valores que as séries de dados de precipitação fornecem, torna-se necessário resumi-los e tratá-los de forma estatística. As medidas de resumo utilizadas no tratamento de dados de precipitação são as medidas de tendência central, de dispersão e de assimetria.

#### 3.6.1. MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

No que toca a medidas de tendência central, inserem-se a média, a mediana, e a moda.

- A média é o mais vulgar dos parâmetros de tendência central e o parâmetro mais importante de localização. Corresponde ao valor central de uma amostra de valores em uma distribuição estatística, é o centro de gravidade de uma amostra. A variação da média indica a variação de todos os valores da amostra como um todo. É determinada através da equação (3.1):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.1)$$

Onde:

- $\bar{x}$  – Representa a média da precipitação [mm];
  - $N$  – Representa o tamanho da amostra [-];
  - $x_i$  – Representa o valor da precipitação no ano  $i$  [mm].
- A mediana divide a amostra, previamente ordenada de forma crescente, ao meio. No caso de uma amostra de dimensão ímpar, a mediana é o valor situado na posição central da amostra. No caso de uma amostra de dimensão par, a mediana é a média dos dois valores centrais da amostra.
  - A moda fornece o valor que ocorre com maior frequência. Para o tratamento de dados de precipitação é uma medida pouco utilizada, uma vez que não é recorrente ocorrer precipitações com o mesmo valor. Contudo, na análise do coeficiente de assimetria, que será abordado mais à frente, é comparado com a moda. Por essa razão torna-se necessário a determinação da moda. Para o caso da precipitação a moda não é determinada pela contagem dos valores de precipitação que ocorreram mais vezes. Para a determinação da moda é geralmente utilizada a equação (3.2)

$$\text{Mod} = \bar{x} - 3(\bar{x} - M) \quad (3.2)$$

Onde:

- $\text{Mod}$  – Representa a moda;
- $\bar{x}$  – Representa a precipitação média;
- $M$  – Representa a mediana.

### 3.6.2. MEDIDAS DE DISPERSÃO

A dispersão é a posição dos dados em relação a uma referência fixa. As medidas de dispersão podem ser determinadas pelo desvio padrão e pelo coeficiente de variação. Ambos os parâmetros são bastante comuns no tratamento de dados de precipitação, permitem saber como os valores de uma determinada série se distribuem em torno de um valor de tendência central, ou seja, em relação a uma referência fixa. A média é o fator mais utilizado como referência fixa, a sua dispersão indica a forma como os dados se distribuem em torno do valor médio [49].

- O desvio padrão apresenta as unidades da amostra, neste caso [mm]. Assume apenas valores positivos. No caso de haver elevada dispersão nos dados, os desvios dos dados em relação à média será elevada e consequentemente o desvio padrão será elevado. O contrário também se verifica no que toca a desvios padrões pequenos;
- O coeficiente de variação é o quociente entre o desvio padrão e a média. Ajuda a perceber a maior ou menor relevância do desvio padrão em relação à média. Quanto maior o coeficiente

maior será o desvio padrão em relação à média, significando que os dados estão dispersos em torno da média. Por ser adimensional permite comparação direta de valores entre amostras. O desvio padrão e o coeficiente de variação são dados pelas equações (3.3) e (3.4) respetivamente:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

$$c. \text{ var.} = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Onde:

- S – Representa o desvio padrão [mm];
- c. var. – Representa o coeficiente de variação [%];
- N – Representa o tamanho da amostra [-];
- $x_i$  – Representa os valores da precipitação diária máxima anual ( $P_{dma}$ ) no ano  $i$  [mm];
- $\bar{x}$  – Representa o valor da precipitação diária máxima anual média da série de dados  $x$ .

De salientar que a equação (3.3) é alusiva ao desvio padrão com correção de viés<sup>5</sup>. Uma vez que as séries de dados são muito pequenas ( $N < 30$ ), torna-se necessário um ajuste da equação.

### 3.6.3. MEDIDAS DE ASSIMETRIA

A assimetria é entendida como o grau de desvio ou de afastamento em relação às medidas de tendência central. É obtida a partir dos parâmetros de medidas de tendência central: média, moda e mediana [50].

- O coeficiente de assimetria toma valores positivos, se a moda amostral é inferior à mediana e à média (*média* > *mediana* > *moda*). Nestes casos diz-se que apresenta assimetria positiva;
- Para valores negativos do coeficiente de assimetria, a moda amostral é superior à mediana e a média (*média* < *mediana* < *moda*). Nestes casos estamos perante uma assimetria negativa;
- No caso em que o coeficiente de assimetria toma o valor de zero, ou muito próximo de zero, as medidas determinadas pela tendência central tomam o mesmo valor (*média* = *mediana* = *moda*).

---

<sup>5</sup> Correção de viés é a divisão por (N-1) no caso de cálculo da variância de uma amostra, e por (N-1)(N-2) no caso do cálculo da assimetria, em vez de N. Tem como objetivo reduzir o afastamento entre a média do valor tanto da variância como da assimetria, de uma determinada amostra e o valor correspondente da mesma população [16].

O coeficiente de assimetria é obtido através da equação (3.5), com correção de véis.

$$g = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \times \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (3.5)$$

Onde:

- $g$  – Representa o coeficiente de assimetria [-];
- $N$  – Representa o tamanho da amostra [-];
- $x_i$  – Representa os valores da precipitação diária máxima anual ( $P_{\text{anual}}$ ) no ano  $i$  [mm];
- $\bar{x}$  – Representa o valor da P(dma média) da série de dados  $x$  [mm].

### 3.6.4. RESULTADOS OBTIDOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

**Tabela 3.4 – Medidas de resumo da precipitação anual para cada posto udográfico.**

| Posto              | P. média anual [mm] | Mediana [mm] | Moda | Dimensão amostra | Desvio Padrão [mm] | C. Variação [%] | C. Assimetria |
|--------------------|---------------------|--------------|------|------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| Achada Grande      | 2212.8              | 2237.5       | 2287 | 10               | 1048.0             | 47              | -0.57         |
| Camacha            | 1469.1              | 1405.8       | 1279 | 10               | 719.7              | 49              | 0.38          |
| Casa do Barreiro   | 1608.7              | 1812.9       | 2222 | 10               | 475.6              | 30              | -1.06         |
| Casa Velha         | 1904.0              | 1685.8       | 1249 | 5                | 1151               | 60              | 0.17          |
| Chão das Feiteiras | 1950.6              | 1868.8       | 1705 | 7                | 848.4              | 43              | 0.45          |
| Curral das Freiras | 1877.0              | 1743.0       | 1475 | 10               | 713.6              | 38              | 0.36          |
| Fajã da Nogueira   | 208.4               | 141.0        | 6    | 7                | 127.4              | 61              | 0.35          |
| Trapiche           | 1208.8              | 1129.1       | 970  | 10               | 633.4              | 52              | 0.33          |

Das séries de registos dos postos em estudo, observa-se que o posto que obteve precipitação média anual mais elevado foi o posto Achada Grande, com um total de 2212.8 mm, por outro lado o posto Fajã da Nogueira apresentou o registo mais baixo com 208.4 mm. A precipitação média anual dos postos é de 1555 mm, ou seja, menos de 30% do que a média anual do posto Achada Grande, e mais 740% da média anual do posto Fajã da Nogueira, postos com maiores e menores registos respetivamente.

O coeficiente de variação foi mais elevado para o posto Fajã da Nogueira apresentando uma variação dos valores da sua amostra em relação à sua média de 61%, indicando assim que existe uma grande dispersão dos dados da série em relação à sua média. O posto que apresenta um coeficiente de variação mais baixo é o posto Casa do Barreiro com 30%.

Nos postos Achada Grande e Casa do Barreiro, o coeficiente de assimetria assume valores negativos, uma vez que têm os valores da moda superiores aos valores da mediana que por sua vez toma valores superiores à média, indicando por isso assimetria negativa. Nos restantes postos a assimetria é positiva.

### 3.7. PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA (FÓRMULA DE WEIBULL)

A probabilidade de não excedência é a probabilidade de um determinado acontecimento não ser igualado ou excedido perante uma determinada amostra. Pode ser obtida através da equação (3.6) de Weibull.

$$F = \frac{i}{N + 1} \quad (3.6)$$

Onde:

- F – Representa a probabilidade de não excedência [-];
- N – Representa a dimensão da amostra [-];
- i – Representa a posição no qual está o valor que se deseja determinar F, [-].

Para a determinação da probabilidade de não excedência a amostra deve estar previamente ordenada de forma crescente, sendo atribuído a cada valor um número (exemplificado por índice j) correspondente à sua posição, ou seja, o primeiro número, será o que tiver o valor de precipitação mais baixo, e recebe o valor de j=1, o segundo valor mais baixo recebe o valor j=2, sendo que o valor mais alto da amostra recebe o número correspondente a j=N. Uma vez que se trata de probabilidades, não se pode assumir um acontecimento como certo, pois apesar de possível é pouco provável, por isso na equação (3.6) é adicionado o valor “1” no denominador, para desta forma nunca obter o acontecimento certo (100%).

No Anexo A5 – Dados para determinação das probabilidades de não excedência do ano hidrológico 2009/2010, entre a Tabela A5. 1 e a Tabela A5. 8 Podem ser consultados os valores utilizados para a determinação da probabilidade de não excedência de cada um dos postos, para a precipitação anual ocorrida no ano hidrológico de 2009/2010. Tendo sido escolhido este ano hidrológico por se tratar do ano que ocorreu a última aluvião na Madeira. Com esta análise pretende-se saber quantos foram os anos em que ocorreram precipitações anuais superiores a precipitada nesse ano e obter a probabilidade de não

haver um ano com precipitações iguais ou superiores. Da observação das tabelas supracitadas tem-se que a probabilidade de não haver um ano tão chuvoso como o de 2009/2010 é: Superior a 38% para o posto Chão das Feiteiras; Superior a 55% para o posto Curral das Freiras; Superior a 67% para o posto Casa Velha; Superior a 70% para os postos: Achada Grande, Camacha, Fajã da Nogueira; Superior a 90 para os postos Casa do Barreiro e Trapiche.

No Anexo A6 – Dados para a determinação da probabilidade de não excedência para precipitação diária máxima anual, entre a Tabela A6. 1 e a Tabela A6. 8 Encontram-se os valores utilizados para a determinação da probabilidade de não excedência de cada posto para valores de  $P(dma)$ , tomando como exemplo o ano hidrológico 2009/2010. Será feita uma análise pretendendo-se obter a probabilidade de não haver precipitações diárias superiores às máximas precipitações diárias ocorridas no ano hidrológico 2009/2010.

Da análise das Tabela A6. 1 até à Tabela A6. 8, observa-se que apenas um posto, Chão das Feiteiras, em dois anos hidrológicos (2010/2011 e 2012/2013), obteve precipitações diárias máximas anuais superiores às ocorridas no ano 2009/2010, obtendo a probabilidade de não ser excedido de 57%. Os postos Casa Velha e Fajã da Nogueira apresentam probabilidades de não excedência superiores a 80%, por terem séries de registos inferiores. Os restantes postos apresentam probabilidades superiores a 90% de não serem excedidos com precipitações semelhantes às ocorridas no ano 2009/2010, de salientar que estas probabilidades só não obtiveram o resultado de 100% uma vez que a fórmula de Weibull utilizada para o cálculo das probabilidades de não excedência não permite o resultado de acontecimento certo.

Com exceção do posto Chão das Feiteiras, todos os postos registaram a máxima precipitação diária no ano hidrológico 2009/2010. O posto no qual ocorreu maior  $P(dma)$  foi o posto Curral das Freiras, com um total de 386 mm. Os postos udográficos registaram em média  $P(dma)$  357 mm no ano hidrológicos 2009/2010. O posto onde ocorreu  $P(dma)$  mais baixas foi o posto Chão das Feiteiras, com 267 mm, no ano 2009/2010, ou seja, menos 25% do que a média dos restantes postos. Por outro lado o posto Chão das Feiteiras registou os valores de  $P(dma)$  mais altos nos anos hidrológicos 2010/2011 (412 mm) e 2012/2013 (430 mm), mais 20% do que a média dos registos máximos ocorridos no ano 2009/2010.

### **3.8. PERÍODO DE RETORNO**

O período de retorno é o número de anos que em média se dá uma determinada ocorrência, de salientar que muitas vezes é associado de forma errada à ideia de repetição. Pode ser obtido a partir da função estatística correspondente à probabilidade de não excedência [51]. É dado pela equação (3.7):

$$T = \frac{1}{1 - F} \quad (3.7)$$

Onde:

- T – Representa o período de retorno [Ano];
- F – Representa a probabilidade de não excedência [-].

Na Tabela 3.5 estão apresentados os períodos de retorno para cada posto em relação à precipitação diária máxima anual, tendo em conta os registos de precipitação do ano hidrológico 2009/2010. Observa-se que T obteve na maioria dos postos o valor máximo de anos de registo da própria estação uma vez que foi nesse ano que ocorreram os valores de P(dma) mais elevados.

**Tabela 3.5 – Períodos de retorno.**

| Posto              | F    | T (anos) |
|--------------------|------|----------|
| Achada Grande      | 0.91 | 11       |
| Camacha            | 0.91 | 11       |
| Casa do Barreiro   | 0.91 | 11       |
| Casa Velha         | 0.83 | 6        |
| Chão das Feiteiras | 0.57 | 2        |
| Curral das Freiras | 0.82 | 6        |
| Fajã da Nogueira   | 0.88 | 8        |
| Trapiche           | 0.91 | 11       |

A probabilidade de um acontecimento com um determinado período de retorno acontecer em um ano, ou em n anos consecutivos pode ser determinada pela equação (3.8).

$$\left(\frac{1}{T}\right)^n \quad (3.8)$$

### 3.9. TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de concentração é um parâmetro importante para a análise de cheias. Pode ser definido como sendo o tempo que a gota de água precipitada no ponto da bacia cinematicamente mais afastado da secção de saída, isto é, o que tem maior tempo de percurso, demora a atingir a secção de saída da mesma. Também pode ser definido como sendo o tempo necessário para que a totalidade da bacia contribua para o escoamento superficial na secção de saída [5]. Para durações de precipitações superiores ao tempo de concentração da própria bacia o valor do caudal de ponta de cheia mantém-se constante, uma vez que a partir de  $t_c$  toda a área da bacia contribui para o caudal chegando à secção de jusante. Segundo Lencastre

em [16] o tempo de concentração de uma bacia é constituído por uma característica constante da bacia e não pelas características das chuvadas. Para a determinação do  $t_c$  os fatores mais importantes a ter em conta são o percurso (linha de água), declive e área da bacia, sendo este último o menos significativo. Existem duas metodologias para a determinação de  $t_c$ , através de formulações cinemáticas ou empíricas. As formulações cinemáticas consideram o processo de movimentação da água na bacia hidrográfica. As formulações empíricas baseiam-se sobretudo nas características da bacia hidrográfica, o percurso, o declive e a área [5]. Existem diversas fórmulas empíricas para a determinação do tempo de concentração, tais como as fórmulas propostas por, Giandotti, Temez e Vem Te Chow.

### 3.9.1. FÓRMULA DE GIANDOTTI

Giandotti propôs a seguinte equação (3.9). Segundo Hipólito em [5] a fórmula derivou do estudo de um grande número de bacias Italianas. Sendo aplicável a bacias com áreas superiores a 300 km<sup>2</sup>.

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.80 \sqrt{\bar{H}}} \quad (3.9)$$

Onde:

- $t_c$  – Representa o tempo de concentração [h];
- $A$  – Representa a área da bacia hidrográfica [km<sup>2</sup>];
- $L$  – Representa o comprimento principal do curso de água [Km];
- $\bar{H}$  – Representa a altura média da bacia, medida a partir da cota da secção em estudo [m].

### 3.9.2. FÓRMULA DE TEMEZ

Temez propôs a equação (3.10), para determinar  $t_c$ , com base na análise de várias bacias em Espanha.

$$t_c = 0.3 \left( \frac{L}{i_{\text{méd}}^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (3.10)$$

Onde:

- $t_c$  – Representa o tempo de concentração [h];
- $L$  – Representa o comprimento do curso de água principal da bacia [km];



- $i_{\text{méd}}$  – Representa o declive médio do curso de água principal da bacia [m/m].

Hipólito em [5] recomenda a equação (3.10) para bacias naturais e com áreas até 3000 km<sup>2</sup>.

### 3.9.3. FÓRMULA DE VEN TE CHOW

A fórmula de Ven Te Chow é apresentada pela equação (3.11):

$$t_c = 0.8773 \left( \frac{L}{\sqrt{i_{\text{méd}}}} \right)^{0.64} \quad (3.11)$$

Onde:

- $t_c$  – Representa o tempo de concentração [h];
- $L$  – Representa o comprimento do curso de água principal da bacia [km];
- $i_{\text{méd}}$  – Representa o declive médio do curso de água principal da bacia [m/m].

**Tabela 3.6 – Tempo de concentração, em horas, para cada uma das bacias hidrográficas em estudo.**

| Bacia hidrográfica | Giandotti | Témez    | Ven Te Chow |
|--------------------|-----------|----------|-------------|
| R. de João Gomes   | 1h18min.  | 2h30min. | 0h46min.    |
| R. de Santa Luzia  | 1h24min.  | 2h42min. | 0h49min.    |
| R. de São João     | 1h29min.  | 2h40min. | 0h49min.    |

Da Tabela 3.6, observa-se que existe pouca variação do tempo de concentração entre cada uma das bacias, seja qual for o método utilizado. Contudo, dependendo do método utilizado para estimar o tempo de concentração, verifica-se uma grande diferença entre os mesmos, sendo que o método de Ven Te Chow apresenta valores bastante mais baixos do que os valores obtidos a partir da fórmula de Témez.

### 3.10. TEMPO DE RESPOSTA

O tempo de resposta é o tempo que se dá desde o pico da precipitação útil<sup>6</sup>, até ao pico de cheia, para uma determinada bacia hidrográfica [52]. O tempo de resposta pode ser determinado multiplicando o tempo de concentração (em horas) por 0.6, como demonstrado na equação (3.12).

$$t_r = 0.6 \times t_c \quad (3.12)$$

Onde:

- $t_r$ , - Representa o tempo de resposta [h];
- $t_c$  – Representa o tempo de concentração [h].

**Tabela 3.7 – Tempo de resposta, em horas, para cada uma das bacias hidrográficas em estudo com base nas diferentes formulações de  $t_c$  estudadas.**

| Bacia hidrográfica | Giandotti | Témez    | Ven Te Chow |
|--------------------|-----------|----------|-------------|
| R. de João Gomes   | 0h47min.  | 1h30min. | 0h28min.    |
| R. de Santa Luzia  | 0h50min.  | 1h37min. | 0h30min.    |
| R. de São João     | 0h53min.  | 1h36min. | 0h29min.    |

---

<sup>6</sup> Precipitação útil é a parte da precipitação que ocorre numa bacia hidrográfica que contribui para o escoamento direto [5]

# ANÁLISE DE DADOS

## 4.1. CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO SOBRE UMA DADA ÁREA

Para o estudo de aluviões, não interessa apenas os valores registados especificamente no local onde se encontra colocado o posto de medição, mas também o valor sobre uma determinada região ou bacia hidrográfica. O valor da distribuição da precipitação não é de forma alguma uniforme, tanto no tempo como no espaço. É por isso, conveniente determinar a precipitação média de uma dada área, a partir de interpolações<sup>7</sup> dos dados obtidos na rede udográfica para obter os pontos desconhecidos [37]. Existem diversos métodos de interpolação de dados de precipitação, uns mais rigorosos do que outros, contudo todos apresentam as suas vantagens e desvantagens, pelo que, para cada região que se pretende fazer a interpolação, deve ser escolhido o método que melhor se adequa. Existem diversos métodos para interpolação de dados de precipitação, tais como: Método da média aritmética; Método dos polígonos de Thiessen; Método das isoietas; Método IDW (Inverse Distance Weighting); Método de Kriging.

### 4.1.1. MÉTODO DA MÉDIA ARITMÉTICA

O método da média aritmética é um método simplista, que pode ser utilizado, no caso de regiões relativamente planas, com características climáticas constantes, com uma distribuição uniforme dos postos, ou quando não é exigido grande rigor para o cálculo da precipitação média [16].

### 4.1.2. MÉTODO DE THIESSEN OU DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA

O método de Thiessen baseia-se na atribuição de uma área de influência para cada posto. Dentro das áreas de influência, tem de existir um posto udográfico. Parte-se do princípio que a precipitação recolhida no posto udográfico é representativa da precipitação para toda a área, atribuindo-se por isso o

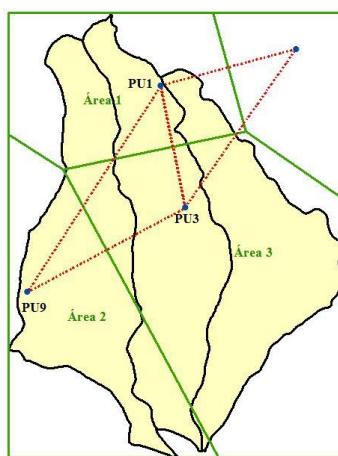
---

<sup>7</sup> A interpolação é um método utilizado para determinar valores desconhecidos de uma determinada função a partir de valores conhecidos da mesma função.

mesmo valor. As áreas de influência são ficticiamente delimitadas por polígonos, em mapas topográficos, ou com recurso a softwares computacionais. Dentro de cada polígono não pode haver mais do que um udógrafo, e toda a área delimitada pelo polígono tem de estar mais próxima do posto udográfico contido dentro da área de influência do que de qualquer outro posto udográfico [16].

A delimitação das áreas de influência pode ser feita, traçando na carta retas que unem conjuntos de três postos udográficos mais próximos, (linhas vermelhas com traço interrompido na Figura 4.1). Não pode haver nenhum posto udográfico situado dentro dos triângulos delimitados. No entanto, podem existir postos que fiquem de fora da área em análise, ou seja, em outra bacia hidrográfica [5]. Após a união dos postos, são traçados mediatrizes de cada segmento de reta, prolongando-se até formar polígonos, que no seu interior passarão a conter um posto udográfico (linhas verdes com traço contínuo na Figura 4.1). Sendo que cada polígono representa a área a considerar para o posto que está no seu interior [5].

Na Figura 4.1 encontra-se esquematizado a título de exemplo as áreas de influência delimitadas com recurso ao ArcGIS 10.4 pelo método de Thiessen, das três principais bacias hidrográficas do Funchal, onde as linhas verdes representam os polígonos, as linhas vermelhas a tracejado representam os triângulos adjacentes entre si, e os pontos azuis representam os postos udográficos.



**Figura 4.1 – Áreas de influência segundo o método de Thiessen.**

Através da equação (4.1) podemos obter a precipitação média relativa a uma determinada área definida pelo método de Thiessen.

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N (P_i \times A_i) \quad (4.1)$$

Onde:

- $\bar{P}$  – Representa a precipitação média da área em estudo [mm];
- $P_i$  – Representa a precipitação no posto  $i$  [mm];
- $A_i$  – Representa a área de influência definida pelo polígono em torno do posto  $i$  [Km<sup>2</sup>];
- $A$  – Representa a área total da bacia [Km<sup>2</sup>];
- $N$  – Representa o número de postos udográficos [-].

O método tem como desvantagens, o facto de não ter em conta a influência do relevo na variação da precipitação. E de ser necessário traçar novas diretrizes cada vez que se cria ou extingue um posto, ou aja mudanças na localização dos postos, ou por perda de dados durante o período de tempo prolongado.

#### 4.1.3. MÉTODO DAS ISOIETAS

O método das isoietas<sup>8</sup> consiste em traçar na carta, linhas de igual precipitação. O traçado das isoietas é feito a partir da precipitação observada nos postos udográficos existentes tanto no interior como na periferia da bacia. As isoietas são delimitadas pela interpolação dos registos pluviométricos dos postos udográficos mais próximos entre si, com ajuda de softwares, tais como ArcGIS, ou através de uma análise mais elaborada que para além da interpolação dos valores obtidos nos postos pode proceder-se a uma correção dos dados tendo em conta os fatores fisiográficos e climáticos, ou seja, tendo em conta a altitude, a distância à costa e a exposição aos ventos [15]. A partir das isoietas procede-se ao cálculo da precipitação média entre a precipitação de duas isoietas consecutivas (Isso  $i$  e Isso  $i+1$ ), e determina-se a área compreendida entre essas duas mesmas isoietas, (como pode ser observado na Figura 4.2). As isoietas podem ser referentes a períodos de tempo diferentes (períodos de precipitação diários, mensais ou anuais), e como tal podem ser definidas para valores de precipitação diferentes. Por exemplo podem ser definidas para valores de precipitação com intervalos de 10 mm para valores de precipitação mensais, ou em intervalos de 100 milímetros para valores de precipitação anual.

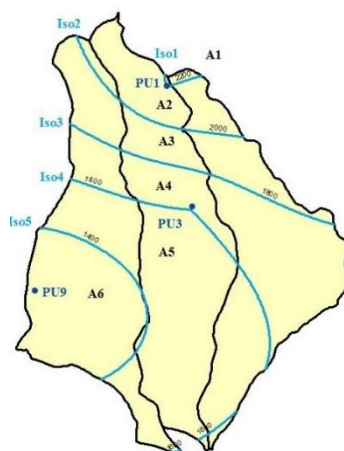
Se designarmos por  $A_i$ , a área compreendida entre isoietas adjacentes entre si e por  $P_i$ , a precipitação média análoga às isoietas consecutivas, o valor da precipitação é obtida pela equação (4.1) [16].

Por um lado este método tem como vantagem em relação ao método de Thiessen o facto de fornecer resultados mais precisos. Por outro lado, tem como desvantagem o facto de ser um método mais laborioso, uma vez que é necessário traçar as isoietas para cada caso a analisar. De salientar que este

---

<sup>8</sup> Isoietas são linhas de igual precipitação.

método carece de uma rede udográfica mais densa que o método anterior, de forma a se obter um maior rigor no traçado das isoietas.



**Figura 4.2 – Esquema de isoietas para determinação da precipitação ponderada sobre uma região.**

#### 4.1.4. MÉTODO DA PONDERAÇÃO PELO INVERSO DA DISTÂNCIA

O método da ponderação pelo inverso da distância, também conhecido como o método IDW do inglês Inverse Distance Weighting, baseia-se na ponderação linear dos registos de precipitação dos postos udográficos. O método admite que o peso a atribuir na quantidade de precipitação é inversamente proporcional à distância, isto é, quanto maior a distância entre o posto udográfico e um ponto de interesse, (ponto onde se pretende estimar a interpolação), menor será o valor da precipitação obtida para esse ponto. O peso que a distância tem sobre o ponto é dado por um expoente ( $w$ ) visível na equação (4.2) que varia entre 2 e 5. Para valores de precipitação, o expoente utilizado é geralmente  $w=2$ . Quanto maior for o valor adotado para o expoente, maior será a influência da distância, ou seja, para expoentes elevados, quanto mais afastado estiver o ponto a ser determinado do posto udográfico menor será o valor da precipitação no ponto [53]. A interpolação pode ser obtida pela equação (4.2).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^w} Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^w}} \quad (4.2)$$

Onde:

- $Z$  – Representa o valor interpolado no ponto de interesse [mm];
- $Z(x_i)$  – Representa o valor no posto udográfico  $x_i$  [mm];
- $d_i$  – Representa a distância entre o posto udográfico e o ponto de interesse [Km];

- $w$  – Representa o fator de ponderação, fornece o peso a atribuir em conjunto com a distância.

O método é utilizado para a definição de isoietas por ser bastante preciso. Contudo tem como desvantagem o facto de não considerar a anisotropia<sup>9</sup> e não ter em conta a variação da vizinhança.

#### 4.1.5. MÉTODO DE KRIGING

O método Kriging ou em Português método de krigagem é referenciado por Yang et al em [53] como sendo o método que melhor se enquadra para interpolação de precipitação. É um método elaborado, e por isso é feito com recurso a programas computacionais. O método admite que a variação espacial de um fenómeno é homogénea perante uma determinada área [53].

Com o passar dos anos foram desenvolvidas diversas técnicas de Kriging, de entre as quais, destacam-se Ordinary Kriging (OK), Universal Kriging (UK) e Ordinary CoKriging (OCK). Para a determinação da precipitação média anual nas bacias hidrográficas em estudo neste trabalho foi adotado o método de Ordinary Kriging com recurso ao software ArcGIS versão 10.4. O OK é um método que permite estimar um determinado valor a partir de um conjunto de valores conhecidos, admitindo que a variação espacial pode ser determinada por variogramas. O variograma é um gráfico de dispersão da variância, pelo conjunto de distâncias ( $h$ ), referidas na equação (4.3).

Para a determinação do valor da precipitação em um determinado ponto de interesse pelo método da Ordinary Kriging são necessários proceder a três passos essenciais, que são:

1. Determinação do variograma em todas as direções;
2. Determinação do peso que será atribuído a cada uma das distâncias para a determinação da precipitação no ponto de interesse;
3. Determinação do valor da precipitação pretendida.

O variograma mostra a diminuição da correlação espacial entre os dois pontos consoante o aumento da distância entre estes [54]. A determinação do variograma pode ser feita a partir da equação (4.3).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (4.3)$$

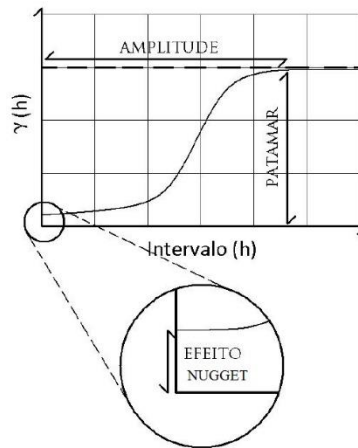
---

<sup>9</sup> Anisotropia são variogramas de diferentes direções de linhas a partir da amostra.

Onde:

- $\gamma(h)$  – Representa o variograma a distância  $h$ ;
- $h$  – Representa as várias distâncias a que se pretende obter o gráfico do variograma;
- $x_i$  – Representa o posto udográfico na posição  $i$ ;
- $Z(x_i)$  – Representa o valor da precipitação no posto udográfico  $x_i$ ;
- $N(h)$  – Representa o número de pares de pontos para cada uma das diferentes distâncias de  $h$ ;
- $Z(x_i+h)$  – Representa o valor da amostra separadas pela distância  $h$ .

Na Figura 4.3 tem-se o esquema de um variograma, em que a amplitude é a distância correspondente entre a origem e o patamar (sill em inglês). Sendo que o patamar é o ponto a partir do qual o  $\gamma(h)$  deixa de ter correlação. O efeito nugget é propositadamente inserido para evitar más estimações para zonas próximas, ou seja, com distâncias de  $h$  muito baixas. De salientar que o esquema do variograma referenciado é apenas para uma única direção. Para o caso em que se considera anisotropia o variograma é apresentado em todas as direções [55].



**Figura 4.3 – Esquema de um variograma.**

Após a determinação dos variogramas para todas as direções e para todas as distâncias, determina-se qual o peso, para cada direção, para cada uma das distâncias e para a estimação do ponto de interesse. A determinação do peso para cada uma das direções e distâncias é feito através do seguinte sistema (4.4):

$$\begin{cases} W_{AY}(h_{AA}) W_{BY}(h_{AB}) W_{CY}(h_{AC}) = \gamma(h_{AO}) \\ W_{AY}(h_{BA}) W_{BY}(h_{BB}) W_{CY}(h_{BC}) = \gamma(h_{BO}) \\ W_{AY}(h_{CA}) W_{BY}(h_{CB}) W_{CY}(h_{CC}) = \gamma(h_{CO}) \end{cases} \quad (4.4)$$

Onde:

- $W$  – Representa o ponderador correspondente à amostra.



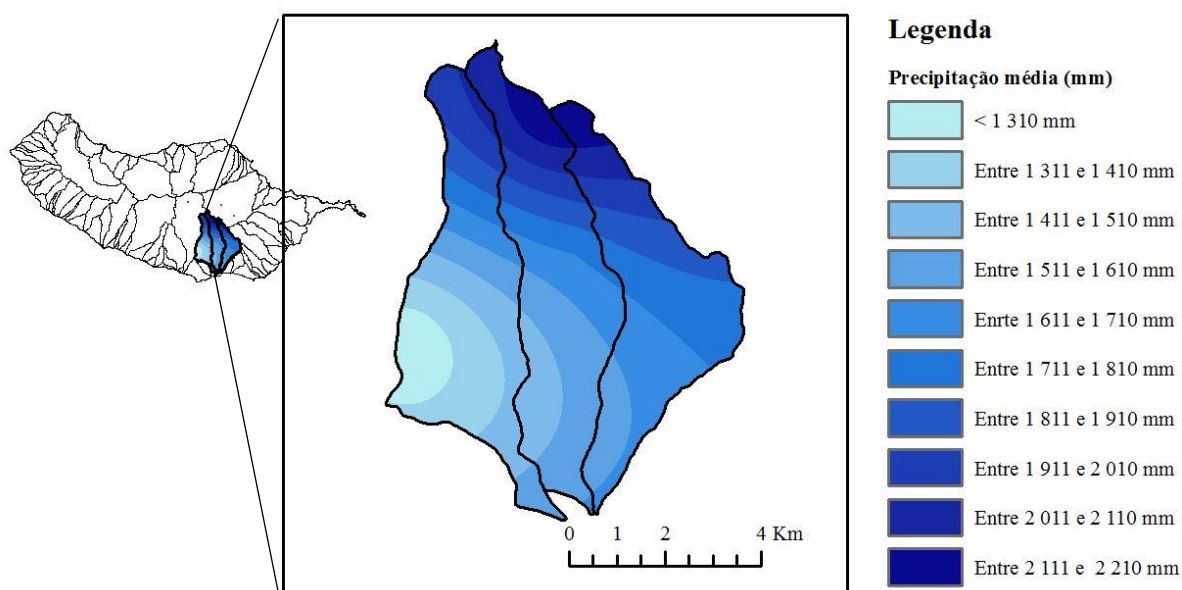
Depois da determinação dos ponderadores para cada uma das amostras passa-se à determinação do valor da precipitação no ponto de interesse, que pode ser obtido pela equação (4.5):

$$P_0 = W_A P_A + W_B P_B + W_C P_C \quad (4.5)$$

Onde:

- $P_0$  – Representa o valor da precipitação no ponto de interesse.

Na Figura 4.4 encontra-se o mapa da variação espacial da precipitação média anual, nas três bacias hidrográficas em estudo. Observa-se que o valor da precipitação é superior nas zonas mais elevadas, sendo que se verifica uma diminuição da precipitação consoante a diminuição da altitude e com a aproximação ao mar. De salientar que da comparação do mapa da Figura 4.4 com o mapa da Figura 2.3 elaborado por Prada e obtido em [18], observa-se grande semelhança nos valores de precipitação alcançados, apesar de serem valores obtidos a partir de redes udográficas diferentes, de serem referentes a períodos de tempo distintos, e pertencentes a toda a ilha. Isto demonstra coerência na qualidade dos dados obtidos.

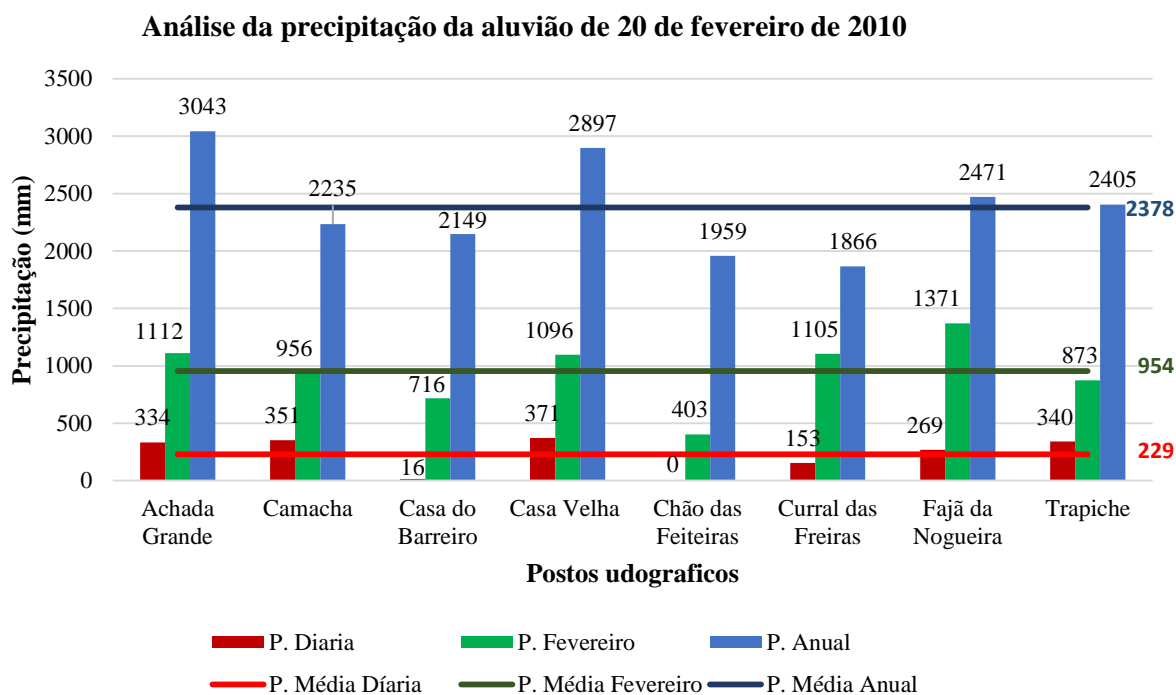


**Figura 4.4 – Variação espacial da precipitação média anual sobre as três bacias hidrográficas em estudo.**

## 4.2. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO DO DIA 20 DE FEVEREIRO DE 2010

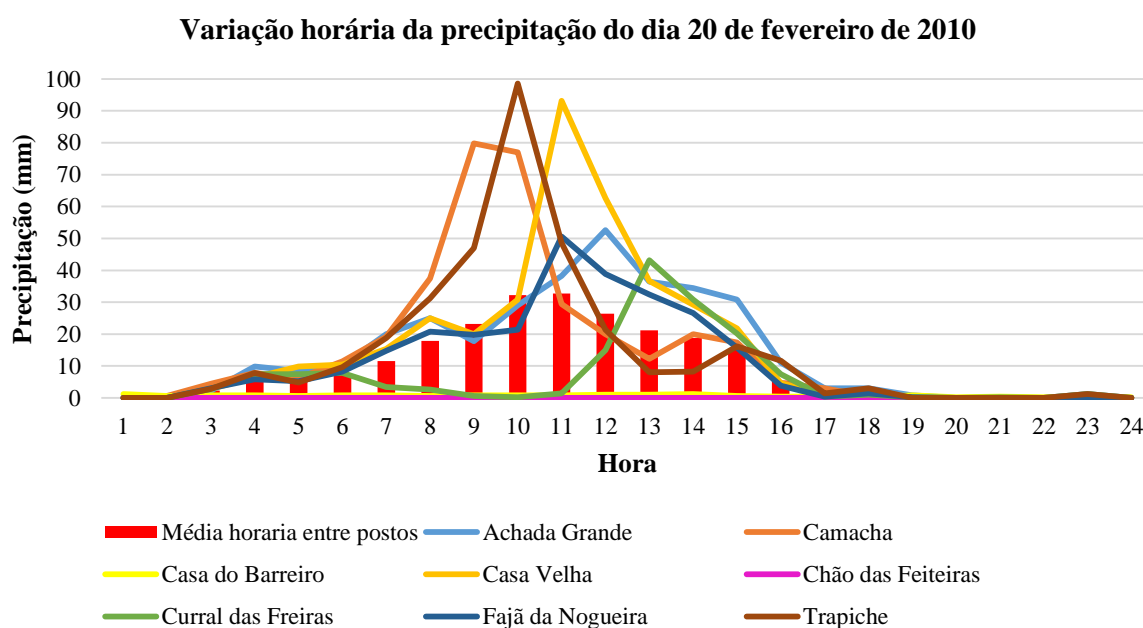
O dia 20 de fevereiro de 2010 foi um dia exceccionalmente chuvoso, no qual ocorreu a última grande aluvião na ilha da Madeira. No gráfico da Figura 4.5, estão representados os registos de precipitação

referentes ao dia 20 de fevereiro de 2010, os registos referentes ao mês de fevereiro de 2010, os registos da precipitação de todo o ano hidrológico 2009/2010 para cada um dos postos em estudo, bem como a média da precipitação entre os postos de cada um dos períodos de tempo referidos.



**Figura 4.5 – Análise da precipitação ocorrida no dia 20 de fevereiro de 2010, da precipitação ocorrida no mês de fevereiro de 2010 e da precipitação ocorrida no ano hidrológico 2009/2010.**

Da análise do gráfico da Figura 4.5 observa-se que a precipitação média que ocorreu no dia 20 de fevereiro foi de 229 mm, o que perfaz em apenas um dia 37% da precipitação média que ocorreu em todo o mês de fevereiro, que foi de 954 mm. Os dados observados no gráfico indicam que para o posto Chão das Feiteiras no dia 20 de fevereiro a precipitação foi de 0 mm, e para todo o mês foi de 403 mm. Estes valores não devem de corresponder à realidade, pois é muito improvável que não tenha ocorrido precipitação neste posto, neste dia. Fazendo uma análise ao mês de fevereiro no mesmo posto, observa-se que o posto apenas fornece registos diferentes a 0 mm nos primeiros 7 dias do mês, o que pode ser uma indicação de que o posto pode ter entupido, e por essa razão deixou de contabilizar a precipitação. O posto Casa do Barreiro também apresenta valores de precipitação nesse dia relativamente baixos, em comparação com os restantes postos, com apenas 16 mm, o que perfaz um total de 2% da precipitação ocorrida no mês. O posto Trapiche no dia 20 de fevereiro apresenta registos de precipitações de 340 mm, o que significa que em apenas um dia choveu 39% da precipitação ocorrida no posto durante todo o mês. Em 4 dos 8 postos, houve registos de precipitação superiores a 300 mm em apenas um dia, destacando-se o posto Casa Velha que obteve o registo mais alto de 371 mm. A precipitação média anual foi de 2378 mm, sendo que o posto Achada Grande obteve o registo anual mais elevado com 3043 mm.

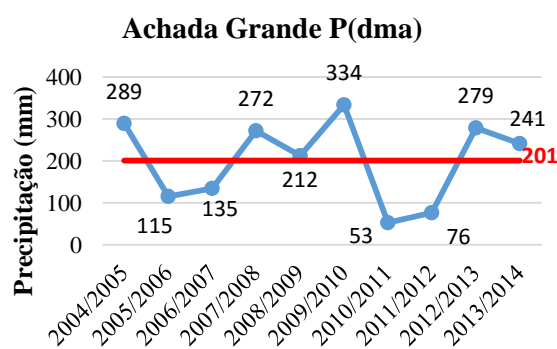


**Figura 4.6 – Variação horária da precipitação no dia 20 de fevereiro de 2010, em cada um dos postos.**

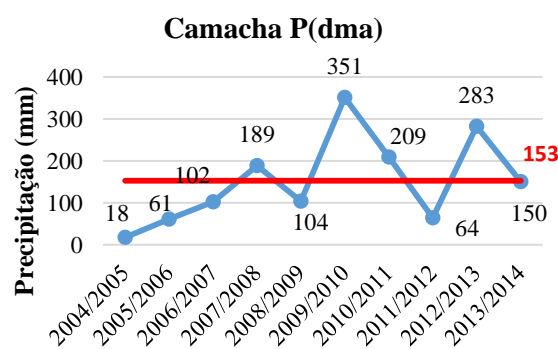
Na Figura 4.6, encontra-se representada a variação horária da precipitação ocorrida no dia 20 de fevereiro de 2010 em cada um dos postos. A precipitação diária acumulada entre todos os postos corresponde a um total de 1834 mm de precipitação. Cerca de 67% da precipitação ocorrida no dia, aconteceu em 5h, entre as 9h e as 14h. Os maiores picos de precipitação ocorreram nos postos Trapiche, Casa Velha e Camacha, com intensidades de 99, 93 e 80 mm/h respetivamente. Ocorreu precipitação com intensidade igual ou superior a 30mm/h, durante 8h consecutivas, das 7h as 15h.

### 4.3. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA ANUAL

Entre a Figura 4.7 e a Figura 4.14 exibe-se os gráficos da variação da P(dma) em cada posto. Onde a linha azul mostra a variação da P(dma) e a linha vermelha a representa a P(dma média).



**Figura 4.7 – Variação da P(dma).**



**Figura 4.8 – Variação da P(dma).**

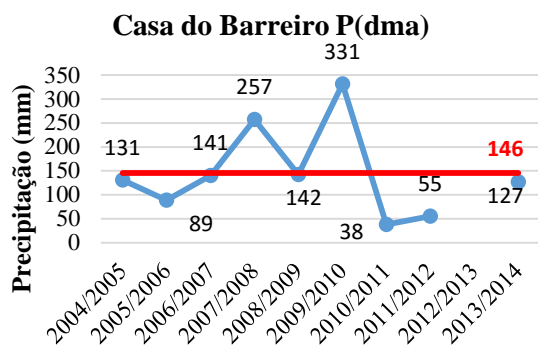


Figura 4.9 – Variação da P(dma).

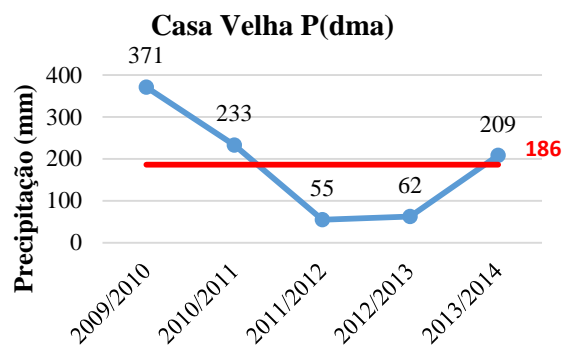


Figura 4.10 – Variação da P(dma)

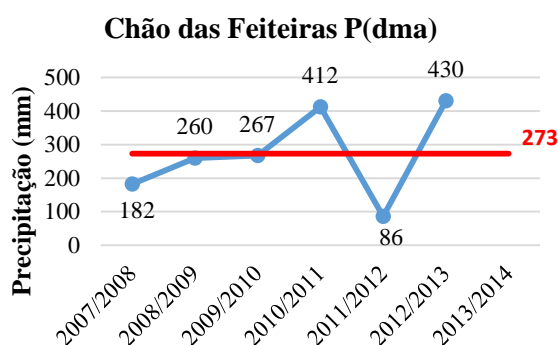


Figura 4.11 – Variação da P(dma).

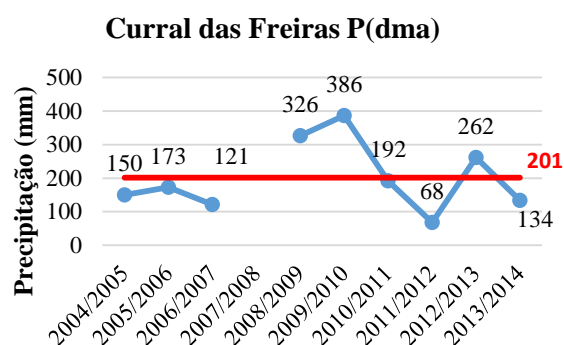


Figura 4.12 – Variação da P(dma) no.

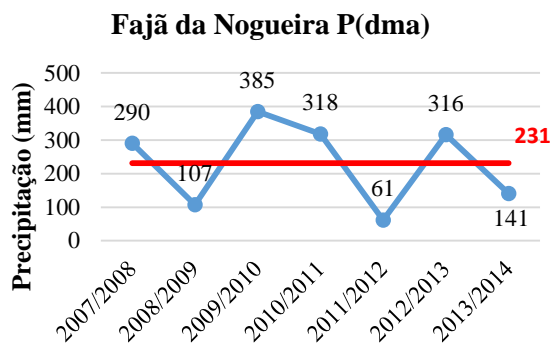


Figura 4.13 – Variação da P(dma).

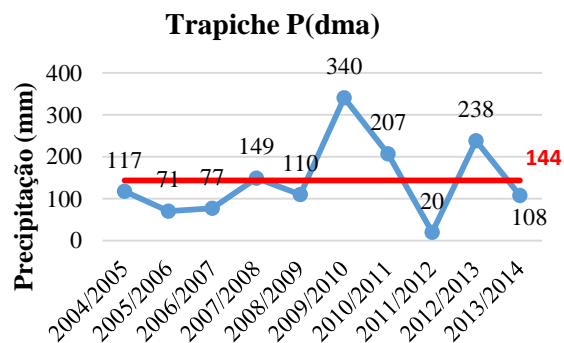


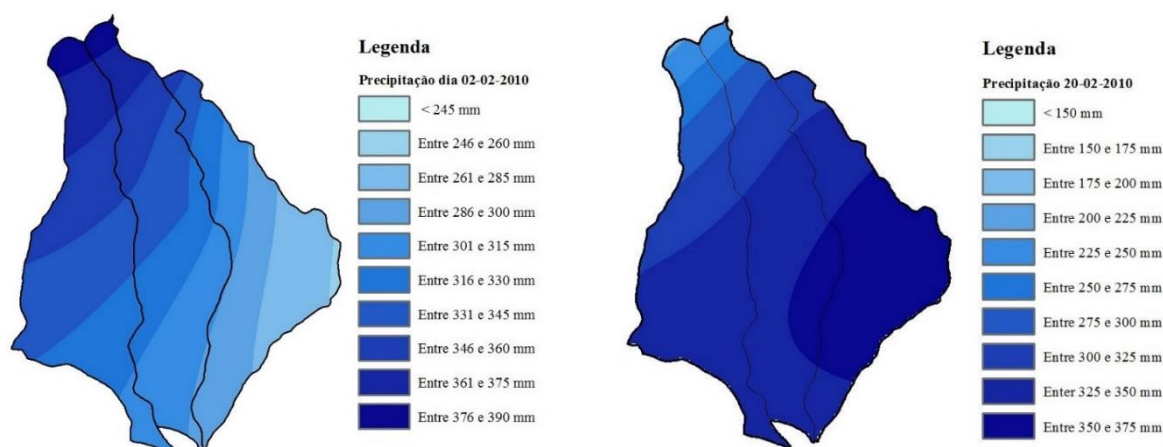
Figura 4.14 – Variação da P(dma).

Da análise dos gráficos entre a Figura 4.7 e a Figura 4.14 observa-se que os registos de P(dma), foram mais altos no ano hidrológico 2009/2010 em quase todos os postos udográficos em estudo, com exceção para o posto Chão das Feiteiras, que apresentou registos de P(dma) superiores nos anos hidrológicos 2010/2011 e 2012/2013. Contudo, a P(dma) registada nos restantes sete postos, no ano hidrológico 2009/2010, não aconteceu no mesmo dia. Os valores de P(dma) desse ano estão divididos entre o dia 02 e 20 de fevereiro de 2010. Na Tabela 4.1 pode-se observar os postos udográficos e os respetivos valores de P(dma) registados tanto no dia 02 como no dia 20 de fevereiro de 2010. Verificando-se que no dia 02 de fevereiro houve valores de precipitação mais elevados do que no dia 20 de fevereiro. Na Figura

4.15 e na Figura 4.16 encontram-se em mapas de cores a interpolação da P(dma) de ambos os dias referidos.

**Tabela 4.1 – Precipitação diária máxima anual, máximas, em cada posto udográfico em estudo.**

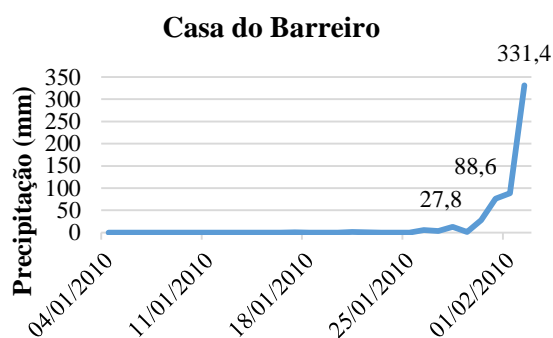
| P(dma) 02 de fevereiro 2010 (mm) |       | P(dma) 20 de fevereiro 2010 (mm) |       |
|----------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| Casa do Barreiro                 | 331.4 | Achada Grande                    | 333.8 |
| Fajã da Nogueira                 | 385.0 | Trapiche                         | 340.2 |
| Curral das Freiras               | 386.0 | Camacha                          | 351.0 |
|                                  |       | Casa Velha                       | 371.0 |



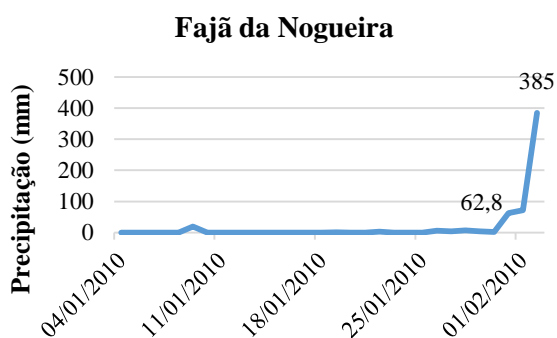
#### 4.3.1. ANÁLISE A PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM 30 DIAS ANTERIORES À PDMA MÁXIMA

De seguida apresentam-se entre a Figura 4.17 e a Figura 4.19 os gráficos da precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010 para os postos que obtiveram valores de Pdma mais elevados, ou seja os postos referidos na Tabela 4.1. Posteriormente será feita uma comparação, com os gráficos da Figura 4.20 à Figura 4.23, que apresentam a precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes à precipitação do dia 20 de fevereiro nos postos onde esta precipitação foi a mais elevada, estes postos podem ser identificados na Tabela 4.1. Apesar de serem postos diferentes, àqueles que registaram P(dma) no dia 02 e no dia 20 de fevereiro, pretende-se comparar os registos dos postos ocorridos nesses dias e analisar a influência da precipitação acumulada no desencadeamento de uma aluvião.

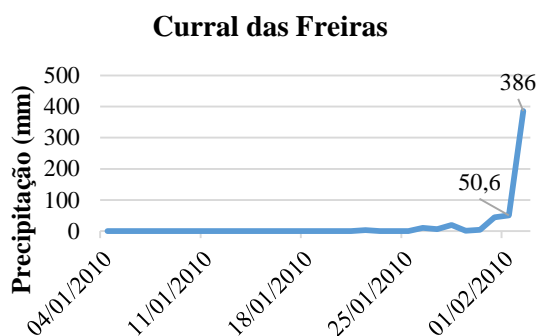
Analisando os gráficos das Figura 4.17 a Figura 4.19 observa-se que nos 30 dias antecedentes ao pico de precipitação ocorrida no dia 02 de fevereiro, não ocorreram precipitações elevadas. No dia 02 de fevereiro todos os postos registaram precipitações acima dos 300 mm, os postos Fajã da Nogueira e Curral das Freiras obtiveram registos de aproximadamente 385 mm, e o posto Casa do Barreiro obteve registos de precipitações de aproximadamente 330 mm, menos 50 mm que os outros dois postos.



**Figura 4.17 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010.**

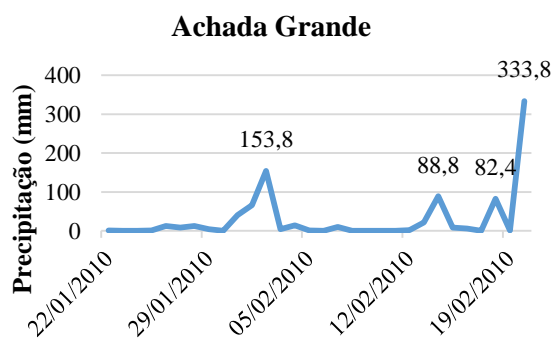


**Figura 4.18 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010.**

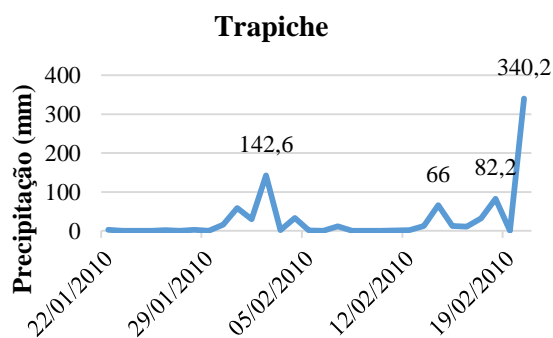


**Figura 4.19 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 02 de fevereiro de 2010.**

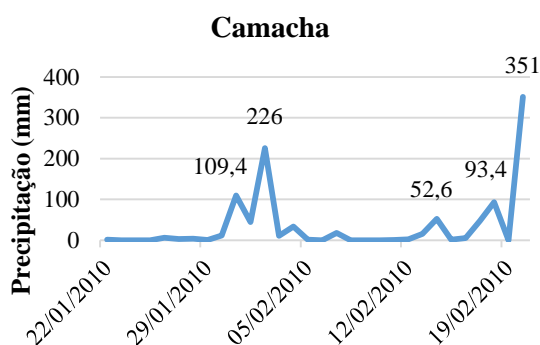
Os gráficos das Figura 4.20 à Figura 4.23, expõem a precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes a P(dma) ocorrida no dia 20 de fevereiro de 2010 nos quatro postos onde foi a mais elevada. Estudando os gráficos observa-se que apesar de ter havido precipitações bastante semelhantes em ambos os dias, (entre 330 e 385 mm, destacando o dia 2 de fevereiro com valores mais elevados que os do dia 20 de fevereiro), nos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro houve precipitações bastante elevadas, com picos de precipitação atingindo valores de 142,6 mm no posto Trapiche e 244,6 mm no posto Casa Velha. O posto Casa Velha apresenta apenas valores da precipitação acumulada dos 20 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro, por não existir registos referentes aos restantes dias.



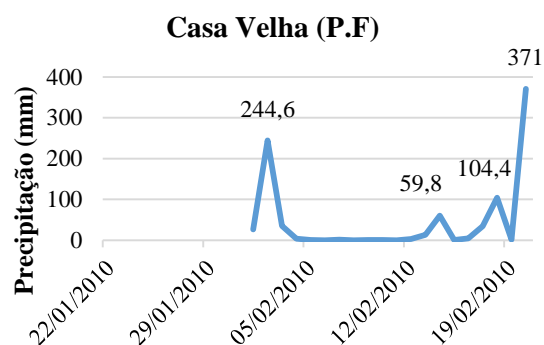
**Figura 4.20 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010.**



**Figura 4.21 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010.**

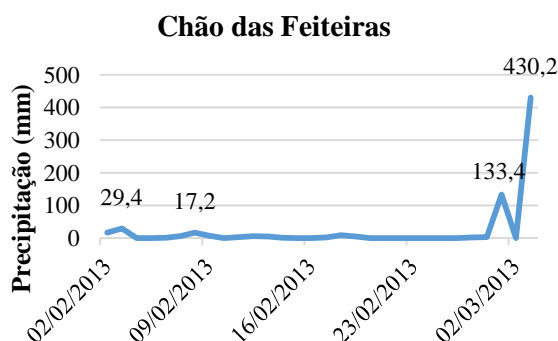


**Figura 4.22 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010.**



**Figura 4.23 – Precipitação acumulada dos 20 dias antecedentes ao dia 20 de fevereiro de 2010.**

Da análise da Figura 4.24 relativo ao posto Chão das Feiteiras, observa-se que apesar de ter havido no dia 02 de março de 2013 um pico de precipitação com 133,4 mm, nos restantes 29 dias antecedentes ao dia 03 de março de 2013 (dia em que foi registada a P(dma) mais elevada do posto com 430,2 mm) não ocorreram grandes precipitações. Pode-se ainda comparar o gráfico da Figura 4.24 com os gráficos correspondentes da Figura 4.17 até à Figura 4.19 pertencentes à precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao pico de precipitação do dia 02 de fevereiro, no qual observa-se grande semelhança, salientando ainda para o facto de não ter havido aluvião dia 02 de fevereiro. Contudo, ao comparar o gráfico da Figura 4.24 com os gráficos análogos da Figura 4.20 até à Figura 4.23, constata-se que surgem precipitações ao longo dos dias, ocorrendo uma aluvião no dia que atingiu o pico de precipitação.



**Figura 4.24 – Precipitação acumulada dos 30 dias antecedentes ao dia 03 de março de 2013 (dia em que ocorreu P(dma máxima)).**

#### 4.3.2. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA ACUMULADA EM 10 DIAS

Na Tabela 4.2 encontram-se os valores da precipitação máxima acumulada em 10 dias para cada ano hidrológico, de cada um dos postos udográficos em estudo. Pretende-se com esta análise ver qual a percentagem de precipitação ocorrida em 10 dias e que é superior à precipitação ocorrida em fevereiro

de 2010. Para isso recorreu-se aos registos de precipitação dos três anos de cada posto onde a precipitação foi máxima em 10 dias.

**Tabela 4.2 - Precipitação máxima acumulada em 10 dias.**

| Posto Udográfico   | Ano Hidrológico | Nº Dias | Desde      | Até        | Precipitação Acumulada [mm] | %     |
|--------------------|-----------------|---------|------------|------------|-----------------------------|-------|
| Achada Grande      | 2004/2005       | 10      | 27/11/2004 | 07/12/2004 | 1189                        | +38.4 |
| Achada Grande      | 2012/2013       | 10      | 28/10/2012 | 07/11/2012 | 973.6                       | +13.3 |
| Achada Grande      | 2009/2010       | 10      | 14/12/2009 | 24/12/2009 | 859.4                       | [-]   |
| Camacha            | 2012/2013       | 10      | 11/02/2012 | 06/11/2012 | 596.8                       | +2.6  |
| Camacha            | 2009/2010       | 10      | 11/02/2010 | 21/02/2010 | 581.4                       | [-]   |
| Camacha            | 2010/2011       | 10      | 19/01/2011 | 29/01/2011 | 460.6                       | -20.8 |
| Casa do Barreiro   | 2009/2010       | 10      | 25/01/2010 | 04/02/2010 | 582.6                       | [-]   |
| Casa do Barreiro   | 2007/2008       | 10      | 01/04/2008 | 11/04/2008 | 470.2                       | -19.3 |
| Casa do Barreiro   | 2004/2005       | 10      | 21/02/2005 | 03/03/2005 | 422.2                       | -27.5 |
| Casa Velha         | 2009/2010       | 10      | 16/02/2010 | 26/02/2010 | 668.6                       | [-]   |
| Casa Velha         | 2010/2011       | 10      | 19/01/2011 | 29/01/2011 | 605.2                       | -9.5  |
| Casa Velha         | 2013/2014       | 10      | 25/11/2013 | 05/12/2013 | 590.2                       | -11.7 |
| Chão das Feiteiras | 2009/2010       | 10      | 19/12/2009 | 29/12/2009 | 1031.4                      | [-]   |
| Chão das Feiteiras | 2010/2011       | 10      | 19/01/2011 | 29/01/2011 | 997.0                       | -3.3  |
| Chão das Feiteiras | 2013/2014       | 10      | 02/12/2013 | 12/12/2013 | 981.2                       | -4.9  |
| Curral das Freiras | 2012/2013       | 10      | 28/10/2012 | 07/11/2012 | 915.6                       | +59.8 |
| Curral das Freiras | 2004/2005       | 10      | 22/02/2005 | 04/03/2005 | 621.4                       | +8.5  |
| Curral das Freiras | 2009/2010       | 10      | 12/02/2010 | 22/02/2010 | 572.8                       | [-]   |
| Fajã da Nogueira   | 2012/2013       | 10      | 28/10/2012 | 07/11/2012 | 1163.2                      | +59.6 |
| Fajã da Nogueira   | 2010/2011       | 10      | 19/01/2011 | 29/01/2011 | 870.0                       | +19.4 |
| Fajã da Nogueira   | 2009/2010       | 10      | 17/02/2010 | 27/02/2010 | 728.8                       | [-]   |
| Trapiche           | 2009/2010       | 10      | 12/02/2010 | 22/02/2010 | 593.8                       | [-]   |
| Trapiche           | 2012/2013       | 10      | 16/01/2012 | 26/02/2012 | 424.4                       | -28.5 |
| Trapiche           | 2010/2011       | 10      | 20/11/2010 | 30/11/2010 | 405.6                       | -31.7 |

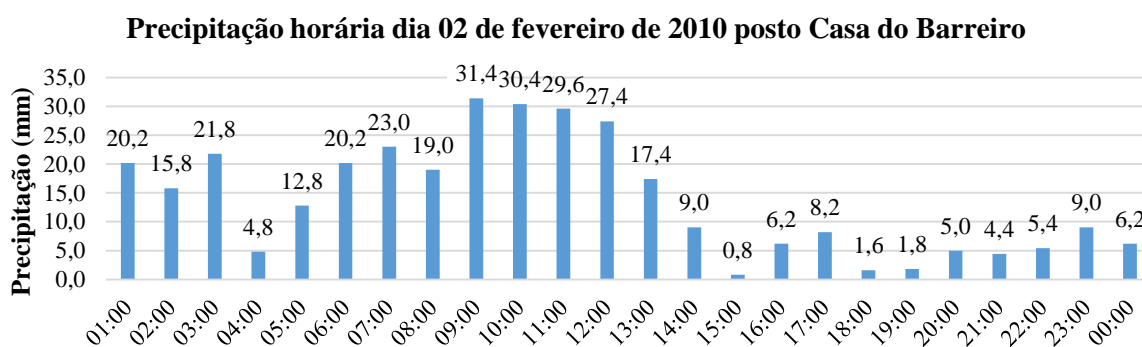
Observa-se na Tabela 4.2 que em alguns postos udográficos, houve em diferentes anos hidrológicos, precipitações acumuladas em 10 dias, bastante superiores à precipitação ocorrida em fevereiro de 2010, das quais não há registos de ter ocorrido aluvião. Um desses postos é o posto Achada Grande, nos anos hidrológicos 2004/2005 e 2012/2013, registaram precipitações superiores às precipitações registadas em fevereiro de 2010 em 38.4% e 13.3% respetivamente. Um outro posto onde ocorreu precipitações acumuladas em 10 dias superiores às ocorridas em fevereiro de 2010 foi o posto Fajã da Nogueira, onde registou-se valores de precipitação acumulada de 59.6% e 19.4% nos anos hidrológicos 2012/2013 e 2010/2011, respetivamente. É de salientar ainda também para os postos Camacha no ano hidrológico



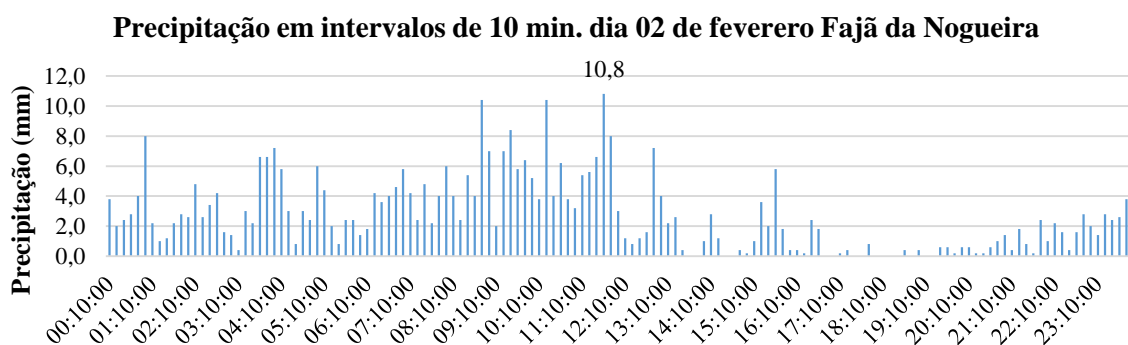
2012/2013 e para o posto Chão das Feiteiras nos anos hidrológicos 2010/2011 e 2013/2014, que obtiveram valores de precipitação acumulada bastante semelhantes aos ocorridos em fevereiro de 2010, porém não ocorreu nenhuma aluvião.

#### 4.3.3. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO PARA A P(DMA MÁXIMA)

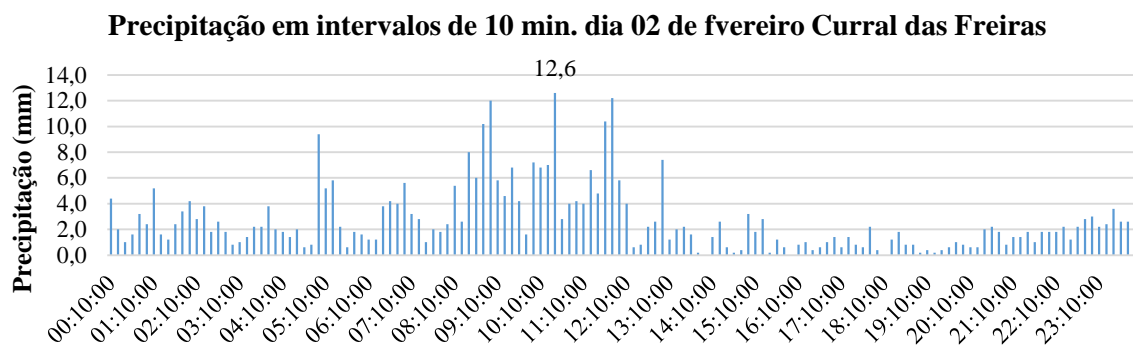
A partir dos gráficos das Figura 4.20 até à Figura 4.26, será feita uma comparação da P(dma máxima) em intervalos 10 minutos (sempre que possível, caso contrário será em intervalos horários), dos dias, 02 e 20 de fevereiro de 2010, conforme os postos referidos na Tabela 4.1, de forma a observar a influência da intensidade de precipitação no desencadeamento das aluviões.



**Figura 4.25 – Variação horária da precipitação do dia 02 de fevereiro.**



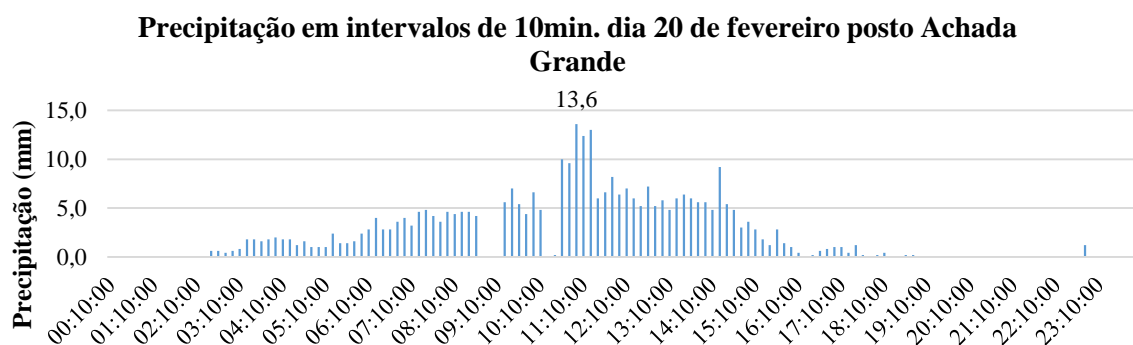
**Figura 4.26 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 02 de fevereiro de 2010.**



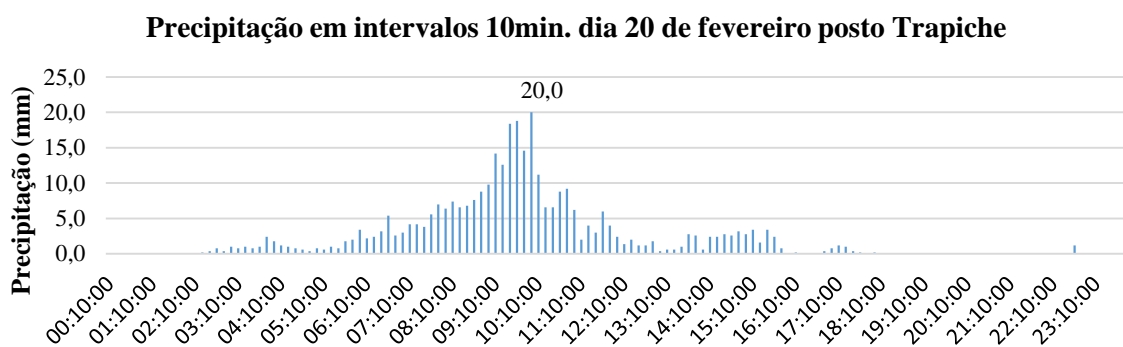
**Figura 4.27 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 02 de fevereiro de 2010.**

Nos gráficos da Figura 4.25 até à Figura 4.27, estão representadas as variações da precipitação diária do dia 02 de fevereiro de 2010. De salientar que para o posto Casa do Barreiro a variação da precipitação é feita de forma horária, uma vez que o posto não apresentava registos inferiores a uma hora no ano hidrológico 2009/2010. Nos postos Fajã da Nogueira e Curral das Freiras, a variação diária da precipitação encontra-se representada em intervalos de 10 minutos. Observando os três gráficos em questão, percebe-se que existe uma relação na variação da precipitação ao longo do dia semelhante nos três postos, o que indica que a precipitação foi semelhante a nível espacial. Os picos mais elevados de precipitação ocorreram entre as 9h e as 12h, a intensidade de precipitação mais elevada registada foi no posto Curral das Freiras, às 11:10h, com intensidade de precipitação de 12,6 mm/10min. O posto Fajã da Nogueira tem como registos de intensidade de precipitação máxima 10,8mm/10min, às 12:10h. O posto Casa do Barreiro apresenta uma intensidade de precipitação máxima às 9h de 31,4mm/hora.

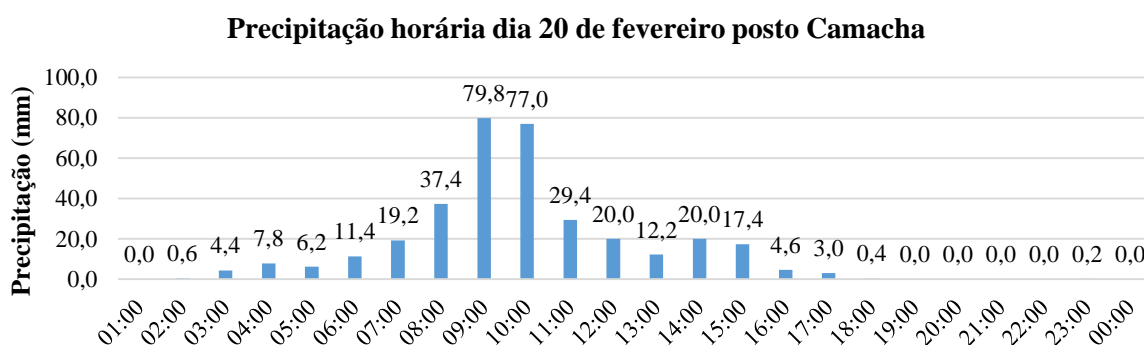
De seguida entre a Figura 4.28 e a Figura 4.31, apresenta-se os gráficos da variação diária da precipitação do dia 20 de fevereiro de 2010.



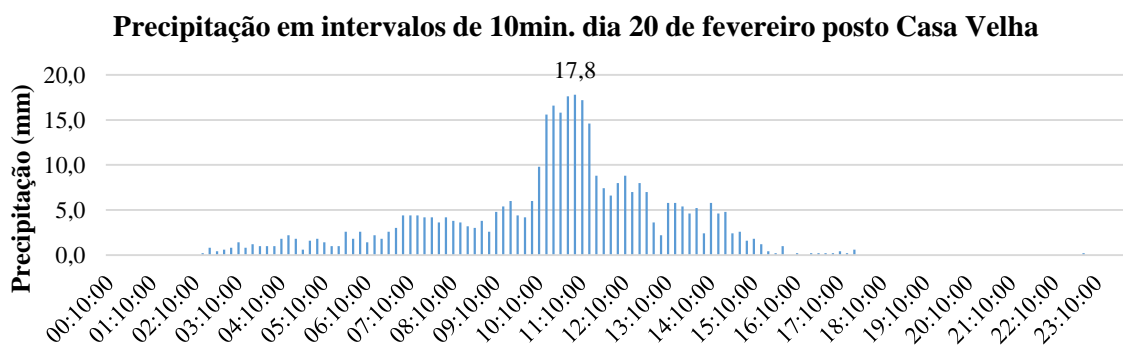
**Figura 4.28 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos, dia 20 de fevereiro de 2010.**



**Figura 4.29 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 20 de fevereiro de 2010.**

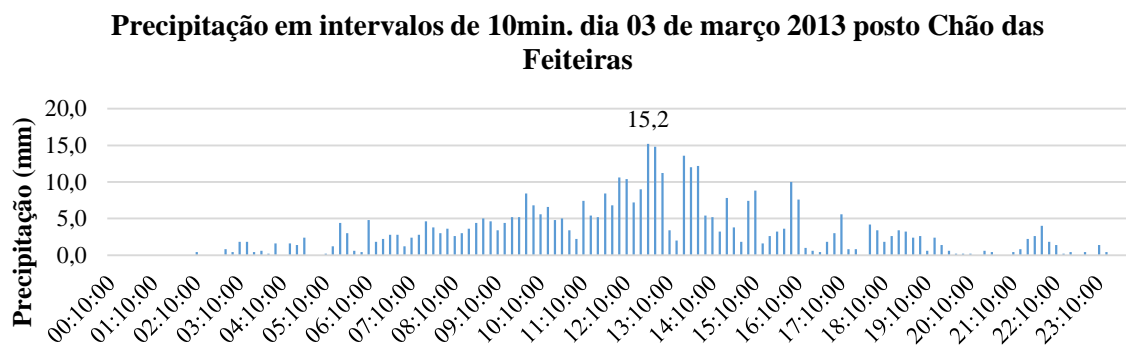


**Figura 4.30 – Variação da precipitação horária do dia 20 de fevereiro de 2010.**



**Figura 4.31 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 20 de fevereiro de 2010.**

Da análise dos gráficos entre a Figura 4.28 e a Figura 4.31, observa-se que o posto Camacha apresenta intervalos de registos horários, os restantes três postos apresentam registos inferiores, em intervalos de 10 min. Observa-se uma variação semelhante da precipitação em todos os postos, o que indica que a precipitação foi constante a nível espacial. A intensidade de precipitação mais elevada ocorreu no posto Trapiche, às 10:00h com 20 mm/10min. Os postos Casa Velha e Achada Grande apresentaram intensidades de precipitação também bastante elevadas de 13.6 mm/10min., e de 17.8 mm/10min., respetivamente. O posto Camacha registou a intensidade máxima de precipitação às 10h de 79.8 mm/hora.

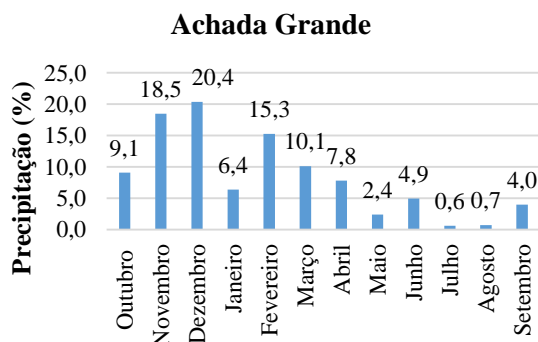


**Figura 4.32 – Variação da precipitação em intervalos de 10 minutos do dia 03 de março de 2013.**

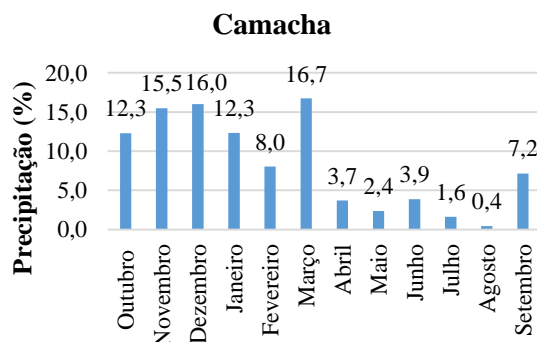
A partir da Figura 4.32, observa-se que a intensidade máxima de precipitação ocorrida no posto Chão das Feiteiras no dia 03 de março de 2013 foi de 15.2 mm/10min., ocorreu às 12:40h. Ao comparar o gráfico da Figura 4.32, com os gráficos da Figura 4.28 até à Figura 4.31 observa-se que a intensidade de precipitação máxima é ligeiramente inferior.

#### 4.4. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO MENSAL

Nos gráficos apresentados entre a Figura 4.33 e a Figura 4.40, expõem-se a variação da precipitação média mensal ao longo dos anos, para cada um dos postos, em percentagens.



**Figura 4.33 – Variabilidade mensal da precipitação.**



**Figura 4.34 – Variabilidade mensal da precipitação.**

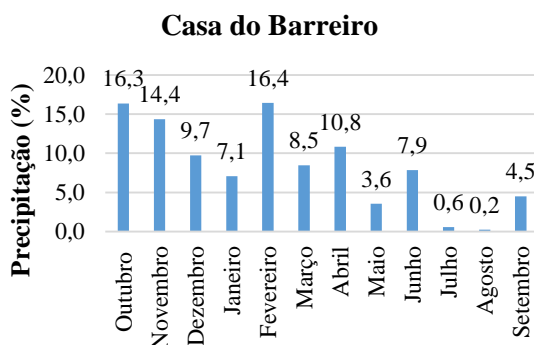


Figura 4.35 – Variabilidade mensal da precipitação.

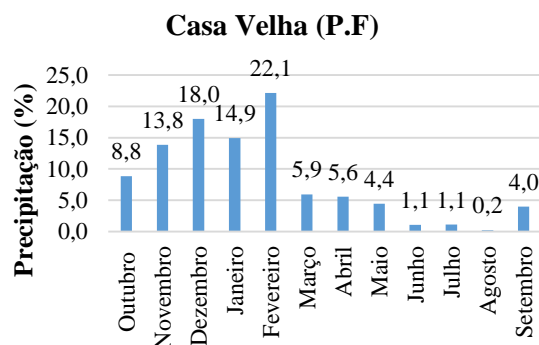


Figura 4.36 – Variabilidade mensal da precipitação.

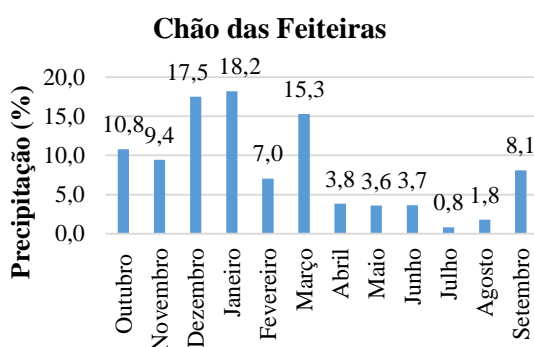


Figura 4.37 – Variabilidade mensal da precipitação.

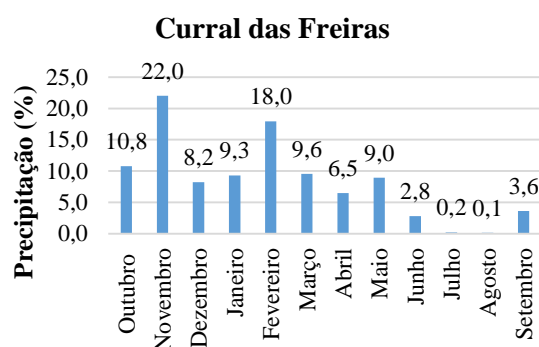


Figura 4.38 – Variabilidade mensal da precipitação.

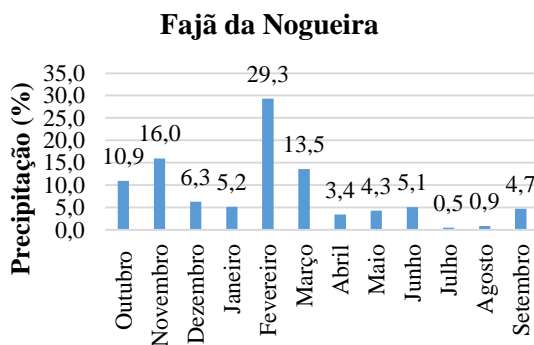


Figura 4.39 – Variabilidade mensal da precipitação.

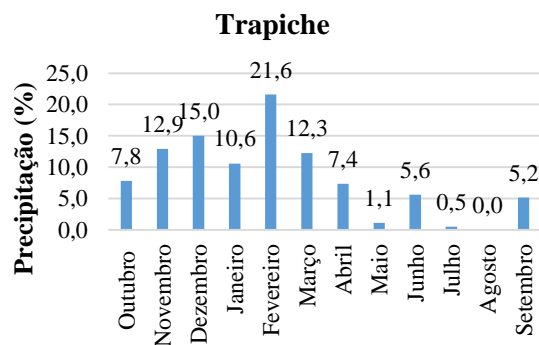
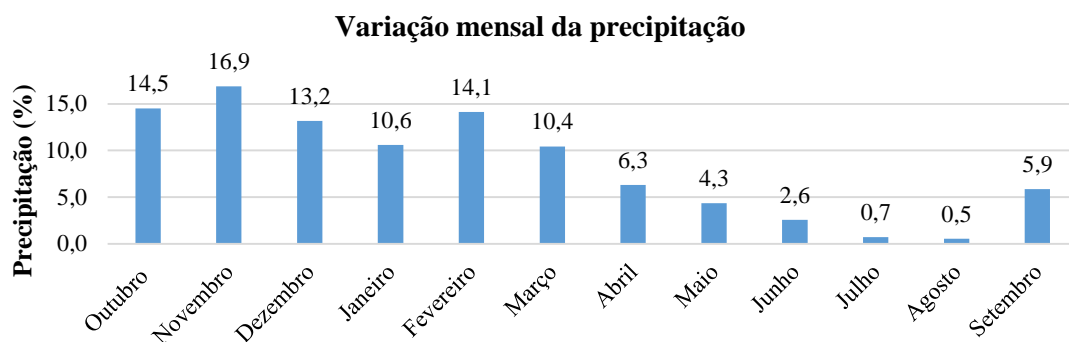


Figura 4.40 – Variabilidade mensal da precipitação.

Da análise individual de cada mês para cada um dos postos observa-se que o mês onde ocorre maior precipitação é o mês de fevereiro. O mês de fevereiro obteve percentagem mais elevada de precipitação, em 4 dos 8 postos (Casa do Barreiro, Casa Velha, Fajã da Nogueira e Trapiche), todos estes postos ficam situados a uma altitude entre os 500 e os 1000 m. O mês de dezembro foi o mês mais chuvoso nos postos Achada Grande e Camacha. O mês de janeiro e de novembro foram os meses onde houve maiores registos de precipitação nos postos Chão das Feiteiras e Curral das Freiras respetivamente. Analisando

a variação da precipitação média mensal ao longo dos anos entre postos, Figura 4.41, nota-se que os meses onde surgem maiores registos de precipitações são: novembro, outubro e fevereiro com 16.9%, 14.5% e 14.1%.



**Figura 4.41 – Percentagem da variação mensal da precipitação.**

**Tabela 4.3 – Resumo da variabilidade da precipitação entre o semestre húmido e seco.**

| Posto              | Estação húmida (%) | Estação seca (%) |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Achada Grande      | 79.7               | 20.3             |
| Camacha            | 80.9               | 19.1             |
| Casa do Barreiro   | 72.4               | 27.6             |
| Casa Velha         | 83.7               | 16.3             |
| Chão das Feiteiras | 78.2               | 21.8             |
| Curral das Freiras | 77.8               | 22.2             |
| Fajã da Nogueira   | 81.2               | 18.8             |
| Trapiche           | 80.2               | 19.8             |

Na Tabela 4.3, encontra-se a variação da precipitação anual, para cada posto, entre o semestre húmido (outubro a março) e o semestre seco (abril a setembro). No semestre húmido ocorre em média 80% da precipitação anual. Tanto os valores referidos na Tabela 4.3 bem como os valores obtidos no gráfico da Figura 4.41 coincidem com os valores referido por Prada em [18], e registados no gráfico da Figura 2.2, que apresenta variações semelhantes para a precipitação quando estudada em toda a ilha.

## 4.5. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO ANUAL

Entre a Figura 4.42 e a Figura 4.49, apresentam-se os gráficos da variação da precipitação anual para cada um dos postos bem como a média. Onde a linha azul representa a variação da precipitação anual e a linha vermelha a precipitação média anual. O registo mais elevado de precipitação anual ocorreu no posto Achada Grande, no ano hidrológico 2004/2005 com 3422 mm/ano, enquanto o registo de precipitação anual mais baixo ocorreu também no posto Achada Grande com 252 mm/ano no ano

hidrológico 2010/2011. Observa-se grande variação da precipitação média anual, variando entre os 1209 mm/ano no posto Trapiche e os 2219 mm/ano no posto Chão das Feiteiras.

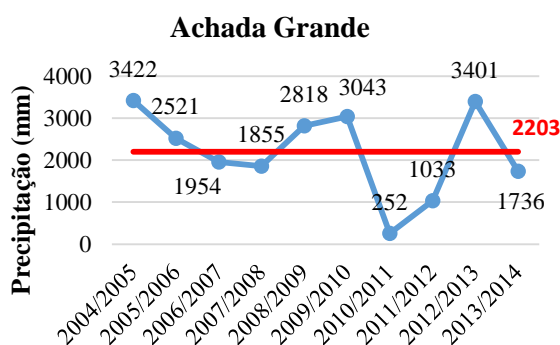


Figura 4.42 – Variação da precipitação anual.

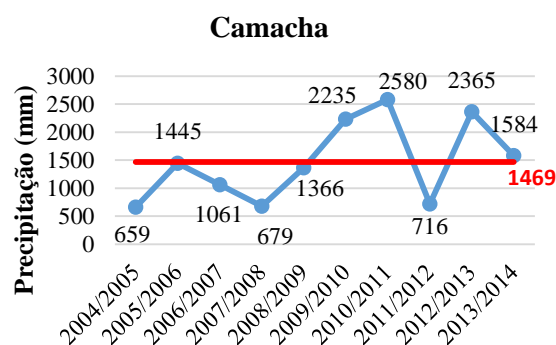


Figura 4.43 – Variação da precipitação anual.

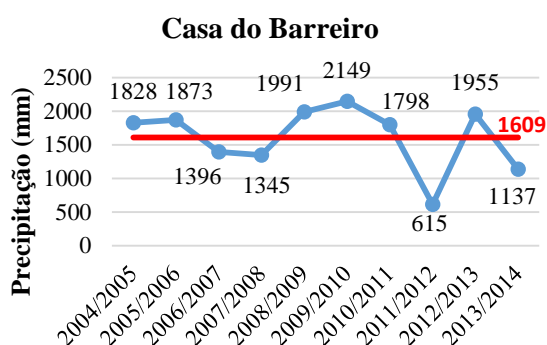


Figura 4.44 – Variação da precipitação anual.

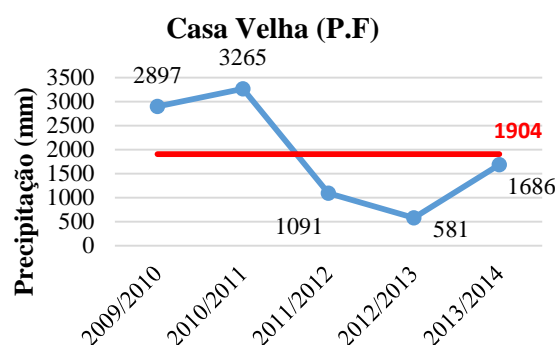


Figura 4.45 – Variação da precipitação anual.

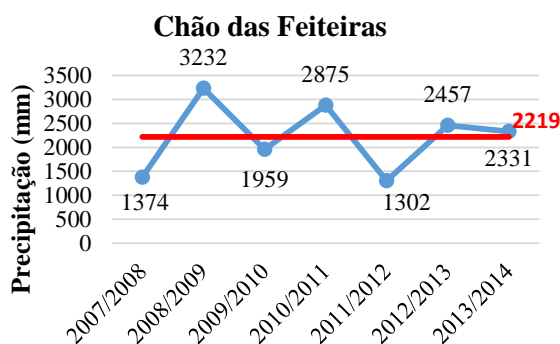


Figura 4.46 – Variação da precipitação anual.

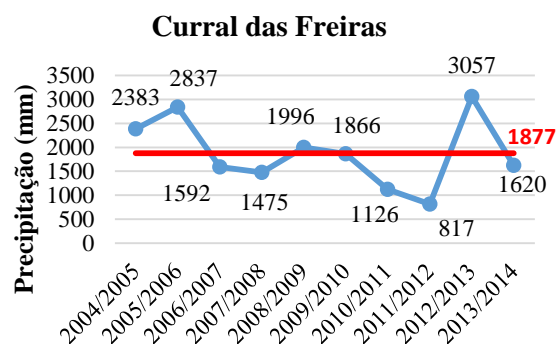


Figura 4.47 – Variação da precipitação anual.

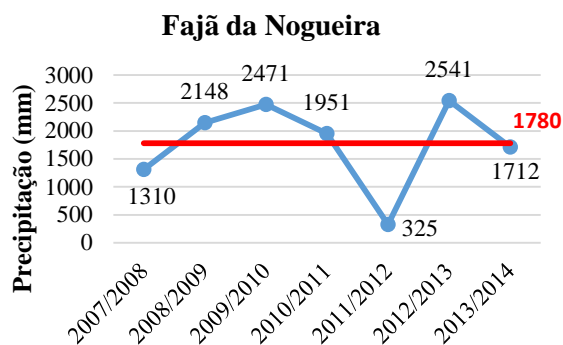


Figura 4.48 – Variação da precipitação anual.

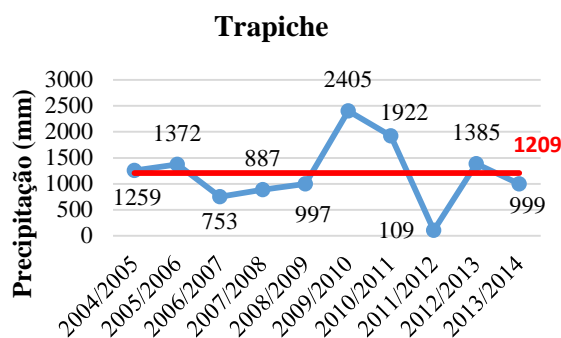


Figura 4.49 – Variação da precipitação anual.

#### 4.6. VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL COM A ALTITUDE

Da análise do gráfico da Figura 4.50, observa-se um aumento da precipitação, consoante a altitude. Os postos Trapiche, Fajã da Nogueira e Camacha, situados a uma altitude inferior aos 800 m exibem valores de precipitação abaixo dos 1500 mm, exceto o posto Fajã da Nogueira. Os postos Curral das Freiras, Casa Velha e Casa do Barreiro, situados a uma altitude entre os 800 e os 1000 m, mostram valores de precipitação entre 1600 e 1900 mm. Os postos Chão das Feiteiras e Achada Grande situados a altitudes acima dos 1000 m, apresentam os valores de precipitação superiores aos 2000 mm.

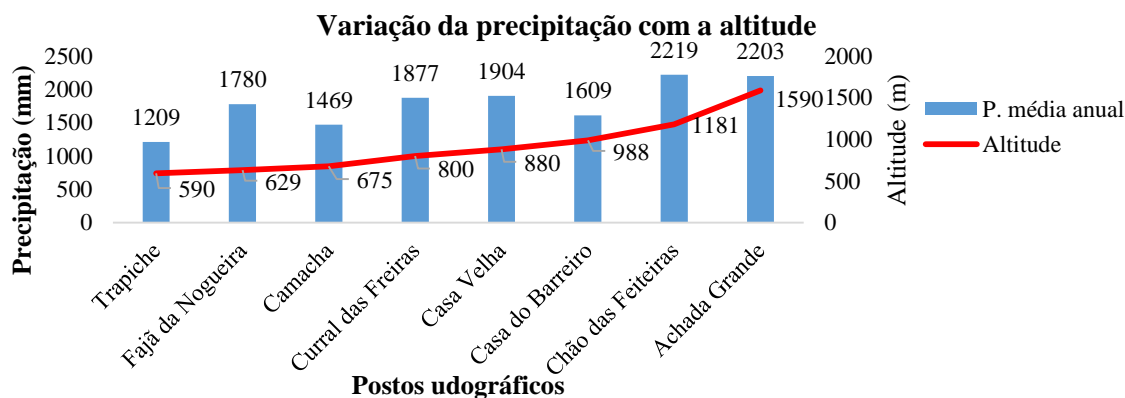


Figura 4.50 – Variação da precipitação com a altitude em cada posto udográfico.



# CONCLUSÕES

## 5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho académico consistiu em investigar a utilidade e a forma de como os udógrafos são uma ferramenta indispensável para a ilha da Madeira de modo a responder a necessidade do estudo da precipitação e de extremos de precipitação, para a mitigação das aluviões. Bem como o tratamento e a análise dos dados de precipitação de 8 postos udográficos pertencentes a rede de udógrafos do LREC.

De forma a mitigar as consequências das aluviões, devem ser implementados sistemas de alerta e de aviso, tais como os instalados no âmbito de Projeto MonitorizaRibeiras. Os udógrafos com sistemas de teletransmissão de dados são uma solução de um equipamento de alerta, o aparelho emite um sinal, informando sobre a possibilidade de poder surgir uma aluvião com base na precipitação ocorrida. Contudo, de salientar que os udógrafos só podem funcionar como equipamentos de alerta, quando utilizados em conjunto com outras ferramentas, tais como os limiares de precipitação. De referir também que a melhor solução, como equipamento de prevenção de aluviões é o radar meteorológico, uma vez que consegue detetar acompanhar e prever uma determinada ocorrência de elevada intensidade de precipitação numa determinada região com alguma antecedência (podendo chegar a algumas horas de antecedência). Contudo, o radar também deve ser acompanhado de outras ferramentas para servir de equipamento de prevenção, de modo a poder ser retirado o máximo partido do equipamento. Mais uma vez uma das ferramentas mais importantes são os limiares de precipitação.

As bacias hidrográficas em estudo neste trabalho (Bacias hidrográficas das Ribeiras de João Gomes, Santa Luzia e de São João), apesar de apresentarem características morfológicas que indicam serem bacias pouco propícias a cheias, por apresentarem forma alongada, existem outras características/ fatores que as tornam vulneráveis à ocorrência das aluviões. Destas características, destacam-se o declive bastante acentuado, precipitações intensas e densidade populacional elevada, sobretudo na cidade do Funchal. A este conjunto de características acrescenta-se também os tempos de concentrações baixos. O facto de serem bacias hidrográficas pequenas leva a que todo o escoamento superficial atinja o curso de água principal de forma rápida e ao mesmo tempo.

Da análise dos dados udográficos dos postos estudados observou-se que apresentam elevadas percentagens de lacunas em quase todos os postos, estas lacunas contribuem para a má qualidade de dados conduzindo a análises imperfeitas e podendo levar a conclusões duvidosas. Apenas o posto Trapiche apresenta lacunas inferiores a 1%. O posto Achada Grande e Casa Velha apresentam percentagens de lacunas baixas, inferiores a 3%. No entanto, os restantes postos udográficos apresentam percentagens de lacunas entre os 11 e os 43%, o que são valores extremamente elevados.

O estudo da análise de qualidade das séries de dados udográficos, foi elaborado a partir do método duplamente acumulado. De salientar que este tipo de estudo é elaborado preferencialmente para séries de dados com pelo menos 25 anos. Porém, neste trabalho académico não foi possível elaborar a análise de qualidade para séries de dados superiores a 10 anos, por se tratar de uma rede udográfica recente. Contudo, as séries de dados udográficos analisadas apresentam uma boa homogeneidade na maioria dos postos, com exceção dos postos Casa Velha, Curral das Freiras e Trapiche.

Os tempos de concentração das diferentes bacias hidrográficas em estudo apresentaram pouca variação, entre as três bacias hidrográficas, como era expectável devido à semelhança morfológica entre as três bacias em estudo. Porém existe uma elevada discrepância entre os resultados obtidos tendo em conta as diferentes formulações utilizadas.

Da análise dos registos de precipitação do dia 20 de fevereiro de 2010 observa-se que, em apenas um dia, ocorreu 229 mm, ou seja, 37% de toda a precipitação que ocorreu no mês de fevereiro, que foi de 954 mm, e 9.6% de toda a precipitação ocorrida nesse mesmo ano hidrológico que foi de 2378 mm. De salientar ainda que da precipitação ocorrida no mesmo dia, cerca de 67% aconteceu num espaço de tempo de apenas 6h, o que proporcionou intensidades de precipitação elevadas, superiores a 30 mm/h durante 8h consecutivas, e atingindo picos de precipitação de quase 100 mm/h.

Da análise da precipitação diária máxima anual, destaca-se o ano hidrológico 2009/2010, que obteve valores acima da média, originando uma aluvião. Contudo, os valores  $P(dma)$  deste ano hidrológico não ocorreram todos no mesmo dia, sendo que em alguns casos ocorreu no dia 02 e em outros postos ocorreu no dia 20 de fevereiro. Em relação ao estudo sobre a precipitação acumulada nas principais bacias hidrográficas do Funchal, e tendo por base a análise dos registos da aluvião ocorrida no dia 20 de fevereiro de 2010, observa-se existir uma ligação na quantidade de precipitação ocorrida nos 30 dias antecedentes ao do dia da aluvião, com valores significativos de precipitação. Observa-se também da análise dos dados udográficos obtidos que para valores de precipitações mais elevados do que os que desencadearam a última grande aluvião na ilha da Madeira (20 de fevereiro de 2010), que não ocorreu aluvião, quando nos 30 dias antecedentes não houve valores de precipitação acumulada muito elevados no solo.

Da análise da precipitação máxima acumulada em 10 dias, elaborada para cada posto, e tendo como comparação os valores obtidos no mês da aluvião do dia de 20 de fevereiro de 2010, observa-se que a intensidade de precipitação pode ser um fator importante para o desencadeamento de uma aluvião, em conjunto com a precipitação acumulada. Uma vez que, verifica-se casos em que ocorreu precipitação acumulada em 10 dias, com picos de intensidade de precipitação baixos que não desencadearam aluvião. No entanto, há registos de precipitação acumulada em 10 dias, não tão elevados, mas que desencadeou uma aluvião, pois existiu picos de precipitação extremamente elevados.

Da análise da variação da precipitação com a altitude, verificou-se que a precipitação média anual aumenta com a altitude, variando entre os 1209 mm/ano no posto udográfico Trapiche a uma altitude de 590 m, e os 2203 mm/ano no posto Achada Grande a uma altitude de 1590 m.

## **5.2. TRABALHOS FUTUROS**

Para a utilização dos udógrafos como equipamentos de monitorização das ribeiras e de aviso, torna-se uma mais-valia a substituição da rede de udógrafos existentes por udógrafos com teletransmissão de dados, em tempo real para a central de monitorização, tais como os udógrafos utilizados no âmbito do Projeto MonitorizaRibeira.

A delimitação dos limiares de precipitação é uma componente indispensável para o estudo de prevenção de aluviões, uma vez que sem eles, os valores de precipitação recolhidos pelos udógrafos, por si só, não indicam qual a proximidade a que se encontra uma ocorrência de aluvião.

O tratamento e análise dos dados das séries de registo dos postos udográficos, tal como elaborado neste trabalho, são uma ferramenta indispensável, e uma mais-valia para o Projeto MonitorizaRibeiras desenvolvido pelo LREC. Pois o tratamento e a análise de dados elaborada são imprescindíveis para o desenvolvimento do trabalho realizado até agora, que proporcionará um melhor conhecimento sobre o comportamento da precipitação que desencadeia as aluviões na ilha da Madeira.

Da análise à rede udográfica estudada, verifica-se que na sua grande maioria locais onde os postos foram colocados apresentam uma boa localização, ou seja, locais sem obstáculos nas proximidades que possam influenciar os dados recolhidos, e onde não se prevê novas construções nas suas proximidades. Contudo aconselha-se a colocação dos udógrafos seguindo as normas da WMO em [14].



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] S. Prada, “Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira,” Funchal, 2000.
- [2] S. M. Sepúlveda, “Avaliação da Precipitação Extrema na Ilha da Madeira,” Lisboa, 2011.
- [3] World Meteorological Organization, Guide to Hydrological Practices: Hydrology- From Measurement to Hydrological Information, 6º ed., vol. I, Geneva: Chairperson, Publications Board, 2008.
- [4] R. Quintal, “Aluviões da Madeira - Ler o Passado, Compreender o Presente, Prevenir o Futuro.,” *XIX Jornadas Pedagógicas de Educação Ambiental da ASPEA*, 2012.
- [5] J. R. Hipólito e Á. C. Vaz, Hidrologia e Recursos Hídricos, Lisboa: Instituto Superior Técnico Press, 2011.
- [6] A. B. Silveira e et al, Notícia Explicativo da Carta Geologica da Ilha da Madeira, Funchal: Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais da Região Autônoma da Madeira, 2010.
- [7] R. Iverson, “The Physics of Debris Flow,” *Reviews of Geophysics*, 35, 3, pp. 246-296, Agosto 1997.
- [8] L. M. M. Arattano, “Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning,” *Sensors*, 8, 2436-2452., 2008.
- [9] R. Iverson, “Debris-Flow Mechanics,” em *Bebris-flow Hazards and Related Phenomena*, Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 105-135.

- [10] S. R. Araújo, “Estudo de soluções de monitorização automática de ribeiras para prevenção do risco de aluviões,” Funchal, 2014.
- [11] A. B. Almeida e et al, Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira, Funchal, 2011.
- [12] World Meteorological Organization, “World Meteorological Organization,” [Online]. Available: [https://www.wmo.int/pages/about/index\\_es.html](https://www.wmo.int/pages/about/index_es.html). [Acedido em 9 Abril 2015].
- [13] World Meteorological Organization, Guide to Hydrological Practices: Data Acquisition and Processing Analysis, Forecasting and Other Applications, 5<sup>o</sup> ed., Geneva: WMO, 1994.
- [14] World Meteorological Organization, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos, Genève: Chairperson, Publication Board, 2008.
- [15] A. C. Quintela, Hidrologia e Recursos Hídricos, Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1996.
- [16] A. Lencastre e F. Franco, Lições de Hidrologia, Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, 2006.
- [17] D. Baioni, “Human Activity and Damaging Landslides and Floods on Madeira Island,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, pp. 3035-3046, 15 November 2011.
- [18] S. Prada, “Apontamentos para as aulas de hidrologia e recursos hídricos,” Universidade da Madeira, 2011.
- [19] S. Prada, A. Perestrelo, M. Sequeira e et al, “Disponibilidades Hídricas da Ilha da Madeira,” Funchal, 2005.

- 
- [20] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=radar01.xml>. [Acedido em 6 Abril 2015].
- [21] C. Brandão, R. Rodrigues e J. P. Costa, “Análise de Fenómenos Extremos Precipitações Intensas em Portugal Continental,” Lisboa, 2001.
- [22] S. Oliveira, J. Zêzere e R. Garcia, “Determinação de Limiares de Precipitação Para o Desencadeamento de Movimentos de Vertente na Bacia do Rio Grande da Pipa, Arruda dos Vinhos,” Lisboa, 2014.
- [23] S. Pereira, J. L. Zêzere e C. Bateria, “Potencialidades dos Limiares Empíricos de Precipitação Para o Desencadeamento de Fluxos de Detritos e de Lama na Região Norte,” Coimbra, 2010.
- [24] S. Pereira, “Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal,” Porto, 2009.
- [25] P. Aleotti, “A Warning System for Rainfall-Induced Shallow Failures,” *Engineering Geology*, pp. 247-265, 2004.
- [26] L. Soares e C. Bateria, “Movimentos de Massa em Vertentes no Norte de Portugal. Retrospectiva e Actualização,” Porto.
- [27] D. Rodrigues, A. Tavares e U. Abreu, “Movimentos de Vertente na Ilha da Madeira. Eventos de Dezembro de 2009 e Fevereiro de 2010,” *Revista Electrónica de Ciências de Terra*, vol. 9, 2010.
- [28] I. Strangeways, “A history of rain gauges,” *Weather*, vol. 65, pp. 133-138, Maio 2010.
- [29] B. Sevruck e S. Klemm, “Catalogue of National Standard Precipitation Gauges,” WMO/TD-No. 313, 1989.

- [30] D. M. Rodrigues, “Análise de Risco de Movimentos de Vertente e Ordenamento do Território na Madeira- Aplicação ao Caso de Machico,” Funchal, 2005.
- [31] S. Lameiras, “Modelação Espaço-Temporal: Uma Aplicação a Dados Ambientais,” Minho, 2010.
- [32] É. Blainski, L. H. Garbossa e E. N. Antunes, “Estações Hidrometeorológicas Automáticas: Recomendações Técnicas Para Instalação,” Florianópolis, 2012.
- [33] UFCG, 13 Agosto 2015. [Online]. Available: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Dren02.html>.
- [34] Instituto Superior de Agronomia, “ISA,” Universidade de Lisboa, [Online]. Available: [www.isa.utl.pt](http://www.isa.utl.pt). [Acedido em 13 agosto 2015].
- [35] World Meteorological Organization, “Guía de Prácticas Hidrológicas: Hidrología - De la Medición a la Información Hidrológica,” Ginebra, 2011.
- [36] Thies Clima, “Thies clima,” 22 setembro 2015. [Online]. Available: <http://www.thiesclima.com/distrometer.html>.
- [37] C. M. Rodrigues, M. Moreira e R. C. Guimarães, “Apontamentos para as aulas de Hidrologia, Universidade de Évora departamento de Engenharia Rural,” Évora, 2015.
- [38] L. Gonçalves, “Relações Intensidade-Duração-Frequência com Base em Estimativa de Precipitação por Satélite,” Porto Alegre, 2011.
- [39] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/otempo/obs.satelite/index.jsp>. [Acedido em 27 Janeiro 2016].



- 
- [40] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/otempo/obs.satelite/index.jsp>. [Acedido em 27 Janeiro 2016].
- [41] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/otempo/obs.radar/index.jsp>. [Acedido em 27 Janeiro 2016].
- [42] S. Barbosa, “*Díário Publico*,” [Online]. Available: <https://www.publico.pt/ciencia/noticia/o-norte-tem-finalmente-um-radar-meteorologico-1685035>. [Acedido em 27 Janeiro 2016].
- [43] World Meteorological Organization, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 7<sup>o</sup> ed., Geneva: Chairperson, Publication Board, 2008.
- [44] J. Searcy e C. Hardison, *Double-Mass Curves - Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water Tecniques*, Washington: United States Gouvernment Printing Office, 1960.
- [45] G. Blain, M. Kayano e M. Camargo, “Variabilidade Amostral das Séries Mensais de Pprecipitação Pluvial em Duas Regioes do Brasil: Pelotas- RS e Campinas-SP,” *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2009.
- [46] World Meteorological Organization, *Guia de Prácticas Climatológicas*, Geneve: WMO, 2011.
- [47] B. Deus e et al, “Interpolação Pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: Uma Analise de Série Historicas e Interpoladores,” em *III Simpósio de Ciência Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação*, 2010.
- [48] C. Portalés, N. Boronat e J. E. Pardo-Pascual, “Seasonal precipitation interpolation at the Valencia region with multivariate methods using geographic and topographic information,” *International journal of climatology*, pp. 1547 - 1563, 2010.
- [49] C. M. Vaz, “Análise de tendências em séries de precipitação diária máxima anual,” Lisboa, 2008.

- [50] F. Correia, “Precipitações Intensas, Caracterização com Base em Séries de Duração Parcial,” Lisboa, 2013.
- [51] J. Silva, “Incerteza Associada à Falha de Registos Udometricos/ Udograficos e Respetiva Estimativa do Escoamento de Superfície,” Lisboa, 2013.
- [52] H. M. Teixeira, “Caracterização Hidráulica, Hidrológica e de Transporte Sólido do Evento de 20 de Fevereiro de 2010 na Ribeira de São João- Ilha da Madeira,” Funchal, 2010.
- [53] G. Yang, J. Zhang e Y. Yang, “Comparison of interpolation methods for typical meteorological factors based on GIS,” Beijing, 2011.
- [54] X. Luo, Y. Xu e S. Y., “Comparison of interpolation methods for spatial precipitation under diverse orographic effects,” *National Natural Science Foundation of China*, 2011.
- [55] F. Marcuzzo, L. Andrade e D. Melo, “Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chivas do estado do Mato Grosso,” *Revista Brasileira de geografia física*, pp. 793-804, 01 12 2011.
- [56] Environmental Systems Research Institute, “ArcGIS Desktop Tutorials,” ESRI, [Online]. Available: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/tutorials/tutorials.htm>. [Acedido em 7 Março 2016].
- [57] P. França, “Monitorização Automática de Ribeiras Para a Prevenção de Riscos de Aluviões na Região Autónoma da Madeira (RAM),” em *WAVECOM - WIRELESS MEETING 2014*, Aveiro, Portugal, 2014.

## ANEXOS

---

### ANEXO A1 – CARACTERÍSTICAS DOS POSTOS UDOGRÁFICOS

**Tabela A1. 1 – Características do posto udográfico Achada Grande.**

|   |                         |
|---|-------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                            | Achada Grande           |
| <b>Código</b>                                   | [-]                     |
| <b>Número de série</b>                          | 13090                   |
| <b>Tipo de Posto</b>                            | Udográfico              |
| <b>Entidade responsável</b>                     | LREC                    |
| <b>Estado</b>                                   | Ativo                   |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>          | 01/10/2004              |
| <b>Período de Registo Horário</b>               | 01/10/2004 – 01/10/2009 |
| <b>Registos com Intervalos de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2009              |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                       | Ribeira de Santa Luzia  |
| <b>Concelho</b>                                 | Funchal                 |
| <b>Altitude (m)</b>                             | 1590                    |
| <b>Coordenada X (m)</b>                         | 320742.95               |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                         | 3621555.52              |



**Figura A1. 1 – Posto udográfico Achada Grande.**

**Tabela A1. 2 – Características do posto udográfico Camacha.**

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Camacha                 |
| <b>Código</b>                                  | [-]                     |
| <b>Número de série</b>                         | 13092                   |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico              |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                    |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                   |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2004              |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | 01/10/2004 – 01/10/2010 |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2010              |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira do Porto Novo   |
| <b>Concelho</b>                                | Santa cruz              |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 675                     |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 327137,25               |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3616170,53              |

**Figura A1. 2 – Posto udográfico Camacha.**



Tabela A1. 3 – Características do posto udográfico Casa do Barreiro.

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Casa do Barreiro        |
| <b>Código</b>                                  | [-]                     |
| <b>Número de série</b>                         | 12595                   |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico              |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                    |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                   |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2004              |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | 01/10/2004 – 01/10/2010 |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2010              |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira de Santa Luzia  |
| <b>Concelho</b>                                | Funchal                 |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 988                     |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 321307,55               |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3618834,71              |



Figura A1. 3 – Posto udográfico Casa do Barreiro.

**Tabela A1. 4 – Características do posto udográfico Casa Velha (P.F).**

|  |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Casa Velha (P.F)      |
| <b>Código</b>                                  | [-]                   |
| <b>Número de série</b>                         | 66028                 |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico            |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                  |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                 |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2009            |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | [-]                   |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2009            |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira de Santa Cruz |
| <b>Concelho</b>                                | Santa Cruz            |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 880                   |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 327712,53             |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3620703,03            |

**Figura A1. 4 – Posto udográfico Casa Velha (P.F).**



Tabela A1. 5 – Características do posto udográfico Chão das Feiteiras.

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Chão das Feiteiras            |
| <b>Código</b>                                  | [-]                           |
| <b>Número de série</b>                         | 610190                        |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico                    |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                          |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                         |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2007                    |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | 01/10/2007 – 01/10/2009       |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2009                    |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira de São Roque do Faial |
| <b>Concelho</b>                                | Machico                       |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 1181                          |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 323779,65                     |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3622385,79                    |



Figura A1. 5 – Posto udográfico Chão das Feiteiras.

Tabela A1. 6 – Características do posto udográfico Curral das Freiras.

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Curral das Freiras      |
| <b>Código</b>                                  | [-]                     |
| <b>Número de série</b>                         | 13370                   |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico              |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                    |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                   |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2004              |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | 01/10/2004 – 01/10/2009 |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2009              |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira dos Socorridos  |
| <b>Concelho</b>                                | Camara de lobos         |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 800                     |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 316425,54               |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3624438,99              |



Figura A1. 6 – Posto udográfico Curral das Freiras.



Tabela A1. 7 – Características do posto udográfico Fajã da Nogueira.

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Fajã da Nogueira              |
| <b>Código</b>                                  | [-]                           |
| <b>Número de série</b>                         | 501485                        |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico                    |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                          |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                         |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2007                    |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | 01/10/2007 – 01/10/2009       |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2009                    |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira de São Roque do Faial |
| <b>Concelho</b>                                | Santana                       |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 629                           |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 321744,39                     |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3624080,69                    |



Figura A1. 7 – Posto udográfico Fajã da Nogueira.

Tabela A1. 8 – Características do posto udográfico PEF.

|  |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | PEF                   |
| <b>Código</b>                                  | [-]                   |
| <b>Número de série</b>                         | 13090                 |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico            |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                  |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                 |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2009            |
| <b>Registo Horário</b>                         | 01/10/2009            |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | [-]                   |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira de João Gomes |
| <b>Concelho</b>                                | Funchal               |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 1300                  |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 322346,44             |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3619700,05            |



Figura A1. 8 – Posto udográfico Parque Ecológico Funchal.



Tabela A1. 9 – Características do posto udográfico Trapiche.

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Nome do posto</b>                           | Trapiche                |
| <b>Código</b>                                  | [-]                     |
| <b>Número de série</b>                         | 610211                  |
| <b>Tipo de Posto</b>                           | Udográfico              |
| <b>Entidade responsável</b>                    | LREC                    |
| <b>Estado</b>                                  | Ativo                   |
| <b>Ano de Entrada em Funcionamento</b>         | 01/10/2004              |
| <b>Período de Registo Horário</b>              | 01/10/2004 – 01/10/2009 |
| <b>Registos com Intervalo de 10 em 10 min.</b> | 01/10/2009              |
| <b>Bacia Hidrográfica</b>                      | Ribeira de São João     |
| <b>Concelho</b>                                | Funchal                 |
| <b>Altitude (m)</b>                            | 590                     |
| <b>Coordenada X (m)</b>                        | 317762,00               |
| <b>Coordenada Y (m)</b>                        | 3616934,00              |



Figura A1. 9 – Posto udográfico Trapiche.



## ANEXO A2 – DADOS PARA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS HIPSOMÉTRICAS

**Tabela A2. 1 – Dados para a elaboração da curva hipsométrica da bacia da Ribeira João Gomes.**

| Altitude [mm] | Área [Km <sup>2</sup> ] | Área acima da cota [Km <sup>2</sup> ] | Área [%] | Área acumulada [%] |
|---------------|-------------------------|---------------------------------------|----------|--------------------|
| 1589          | 0.00                    | 0.00                                  | 0.00     | 0.00               |
| 1500          | 0.32                    | 0.32                                  | 2.46     | 2.46               |
| 1400          | 0.79                    | 1.11                                  | 6.08     | 8.54               |
| 1300          | 0.55                    | 1.66                                  | 4.23     | 12.77              |
| 1200          | 0.84                    | 2.50                                  | 6.46     | 19.23              |
| 1100          | 1.13                    | 3.63                                  | 8.69     | 27.92              |
| 1000          | 1.32                    | 4.95                                  | 10.15    | 38.08              |
| 900           | 1.08                    | 6.03                                  | 8.31     | 46.38              |
| 800           | 1.23                    | 7.26                                  | 9.46     | 55.85              |
| 700           | 1.10                    | 8.36                                  | 8.46     | 64.31              |
| 600           | 0.81                    | 9.17                                  | 6.23     | 70.54              |
| 500           | 0.69                    | 9.86                                  | 5.31     | 75.85              |
| 400           | 0.63                    | 10.49                                 | 4.85     | 80.69              |
| 300           | 0.63                    | 11.12                                 | 4.85     | 85.54              |
| 200           | 0.58                    | 11.70                                 | 4.46     | 90.00              |
| 100           | 0.57                    | 12.27                                 | 4.38     | 94.38              |
| 0             | 0.73                    | 13.00                                 | 5.62     | 100.00             |

**Tabela A2. 2 – Dados para a elaboração da curva hipsométrica da bacia da Ribeira de Santa Luzia.**

| Altitude | Área [Km <sup>2</sup> ] | Área acima da cota [Km <sup>2</sup> ] | Área [%] | Área acumulada [%] |
|----------|-------------------------|---------------------------------------|----------|--------------------|
| 1778     | 0.00                    | 0.00                                  | 0.00     | 0.00               |
| 1700     | 0.15                    | 0.15                                  | 1.03     | 1.03               |
| 1600     | 0.49                    | 0.64                                  | 3.43     | 4.46               |
| 1500     | 0.78                    | 1.42                                  | 5.45     | 9.91               |
| 1400     | 1.00                    | 2.42                                  | 6.93     | 16.84              |
| 1300     | 0.73                    | 3.15                                  | 5.09     | 21.92              |
| 1200     | 0.79                    | 3.94                                  | 5.52     | 27.44              |
| 1100     | 0.77                    | 4.71                                  | 5.37     | 32.82              |
| 1000     | 0.83                    | 5.54                                  | 5.77     | 38.59              |
| 900      | 0.77                    | 6.31                                  | 5.33     | 43.92              |
| 800      | 0.88                    | 7.19                                  | 6.14     | 50.06              |
| 700      | 0.91                    | 8.10                                  | 6.30     | 56.36              |
| 600      | 0.96                    | 9.06                                  | 6.71     | 63.07              |
| 500      | 0.99                    | 10.05                                 | 6.87     | 69.94              |
| 400      | 0.81                    | 10.85                                 | 5.62     | 75.56              |
| 300      | 0.90                    | 11.75                                 | 6.24     | 81.80              |
| 200      | 0.99                    | 12.74                                 | 6.87     | 88.67              |
| 100      | 0.99                    | 13.72                                 | 6.86     | 95.53              |
| 0        | 0.64                    | 1436                                  | 4.47     | 100.00             |

**Tabela A2. 3 – Dados para a elaboração da curva hipsométrica da bacia da Ribeira de São João.**

| <b>Altitude [m]</b> | <b>Área [Km<sup>2</sup>]</b> | <b>Área acima da cota [Km<sup>2</sup>]</b> | <b>Área [%]</b> | <b>Área acumulada [%]</b> |
|---------------------|------------------------------|--|-----------------|---------------------------|
| 1761                | 0.00                         | 0.00                                       | 0.00            | 0.00                      |
| 1700                | 0.13                         | 0.13                                       | 0.84            | 0.84                      |
| 1600                | 0.40                         | 0.53                                       | 2.70            | 3.53                      |
| 1500                | 0.51                         | 1.04                                       | 3.37            | 6.90                      |
| 1400                | 0.65                         | 1.68                                       | 4.31            | 11.21                     |
| 1300                | 0.73                         | 2.41                                       | 4.87            | 16.09                     |
| 1200                | 0.52                         | 2.94                                       | 3.49            | 19.57                     |
| 1100                | 0.62                         | 3.56                                       | 4.14            | 23.71                     |
| 1000                | 0.76                         | 4.32                                       | 5.09            | 28.80                     |
| 900                 | 0.85                         | 5.17                                       | 5.67            | 34.46                     |
| 800                 | 0.84                         | 6.02                                       | 5.62            | 40.09                     |
| 700                 | 0.93                         | 6.94                                       | 6.19            | 46.27                     |
| 600                 | 1.04                         | 7.99                                       | 6.96            | 53.23                     |
| 500                 | 1.20                         | 9.19                                       | 8.03            | 61.26                     |
| 400                 | 1.50                         | 10.69                                      | 9.97            | 71.23                     |
| 300                 | 1.62                         | 12.31                                      | 10.79           | 82.02                     |
| 200                 | 1.32                         | 13.63                                      | 8.81            | 90.83                     |
| 100                 | 0.82                         | 14.45                                      | 5.45            | 96.28                     |
| 0                   | 0.56                         | 15.00                                      | 3.72            | 100.00                    |

## ANEXO A3 – DADOS PARA CONSTRUÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS

**Tabela A3. 1 – Dados para construção do perfil longitudinal da ribeira de João Gomes.**

| Ribeira de João Gomes |                   |             |
|-----------------------|-------------------|-------------|
| Altitude              | Dist. entre curva | Dist. à foz |
| 1589.02               | 0.497             | 10.271      |
| 1500                  | 0.857             | 9.773       |
| 1400                  | 0.438             | 8.916       |
| 1300                  | 0.547             | 8.478       |
| 1200                  | 0.876             | 7.931       |
| 1100                  | 0.61              | 7.055       |
| 1000                  | 0.33              | 6.445       |
| 900                   | 0.329             | 6.115       |
| 800                   | 0.470             | 5.786       |
| 700                   | 0.568             | 5.316       |
| 600                   | 0.422             | 4.748       |
| 500                   | 0.460             | 4.326       |
| 400                   | 0.751             | 3.866       |
| 300                   | 0.422             | 3.115       |
| 200                   | 1.197             | 2.693       |
| 100                   | 1.496             | 1.496       |
| 0                     | 0                 | 0           |

**Tabela A3. 2 – Dados para construção do perfil longitudinal da Ribeira de Santa Luzia**

| Ribeira de Santa Luzia |                    |             |
|------------------------|--------------------|-------------|
| Altitude               | Dist. entre curvas | Dist. à foz |
| 1778.34                | 0.091              | 11.351      |
| 1700                   | 0.428              | 11.260      |
| 1600                   | 0.529              | 10.832      |
| 1500                   | 0.620              | 10.303      |
| 1400                   | 0.581              | 9.68        |
| 1300                   | 0.103              | 9.102       |
| 1200                   | 0.410              | 8.999       |
| 1100                   | 0.529              | 8.589       |
| 1000                   | 0.173              | 8.06        |
| 900                    | 0.154              | 7.887       |
| 800                    | 0.655              | 7.733       |
| 700                    | 0.624              | 7.078       |
| 600                    | 0.697              | 6.454       |
| 500                    | 0.759              | 5.757       |
| 400                    | 1.120              | 4.998       |
| 300                    | 0.989              | 3.878       |
| 200                    | 1.198              | 2.889       |
| 100                    | 1.691              | 1.691       |
| 0                      | 0                  | 0           |

**Tabela A3. 3 – Dados para construção do perfil longitudinal da Ribeira de São João.**

| Ribeira de São João |                    |             |
|---------------------|--------------------|-------------|
| Altitude            | Dist. entre curvas | Dist. à foz |
| 1761.66             | 0                  | 11.130      |
| 1700                | 0.447              | 11.130      |
| 1600                | 0.403              | 10.683      |
| 1500                | 0.488              | 10.280      |
| 1400                | 0.462              | 9.792       |
| 1300                | 0.211              | 9.330       |
| 1200                | 0.349              | 9.119       |
| 1100                | 0.409              | 8.770       |
| 1000                | 0.527              | 8.361       |
| 900                 | 0.697              | 7.834       |
| 800                 | 0.572              | 7.137       |
| 700                 | 0.655              | 6.565       |
| 600                 | 0.673              | 5.910       |
| 500                 | 0.744              | 5.237       |
| 400                 | 0.766              | 4.493       |
| 300                 | 0.987              | 3.727       |
| 200                 | 1.222              | 2.740       |
| 100                 | 1.518              | 1.518       |
| 0                   | 0                  | 0           |





## ANEXO A4 – DADOS PARA REALIZAÇÃO DO MÉTODO DUPLAMENTE ACUMULADO

Tabela A4. 1 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Achada Grande.

| Ano hidrológico | Posto com lacunas | Postos auxiliares |          |          |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Achada Grande     | PU3               | PU5      | PU7      | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual          | P. Anual          | P. Anual | P. Anual |                                |              |                   |
| 2004/2005       | 3472,4            | 1827,6            |          | 2383,4   | 2105,5                         | 2106         | 3472              |
| 2005/2006       | 2520,8            | 1873,0            |          | 2837,4   | 2355,2                         | 4461         | 5993              |
| 2006/2007       | 1954,2            | 1396,4            |          | 1591,9   | 1494,1                         | 5955         | 7947              |
| 2007/2008       | 1852,6            | 1344,8            |          | 1475,4   | 1410,1                         | 7365         | 9800              |
| 2008/2009       | 2817,6            | 1991,2            |          | 1995,6   | 1993,4                         | 9358         | 12618             |
| 2009/2010       | 3088,4            | 2148,6            |          | 1865,7   | 2007,1                         | 11365        | 15706             |
| 2010/2011       | 252,0             | 1798,3            |          | 1125,7   | 1462,0                         | 12827        | 15958             |
| 2011/2012       | 1033,0            | 615,2             |          | 817,0    | 716,1                          | 13544        | 16991             |
| 2012/2013       | 3400,6            | 1954,9            |          | 3057,4   | 2506,2                         | 16050        | 20392             |
| 2013/2014       | 1736,0            | 1136,6            |          | 1620,4   | 1378,5                         | 17428        | 22128             |

Tabela A4. 2 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Camacha.

| Ano hidrológico | Posto com lacunas | Postos auxiliares |          |          |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Camacha           | PU3               | PU4      | PU9      | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual          | P. Anual          | P. Anual | P. Anual |                                |              |                   |
| 2004/2005       | 659,2             | 1827,6            |          | 1259,0   | 1543,3                         | 1543         | 659               |
| 2005/2006       | 1445,2            | 1873,0            |          | 1371,6   | 1622,3                         | 3166         | 2104              |
| 2006/2007       | 1061,4            | 1396,4            |          | 752,6    | 1074,5                         | 4240         | 3166              |
| 2007/2008       | 679,1             | 1344,8            |          | 886,6    | 1115,7                         | 5356         | 3845              |
| 2008/2009       | 1366,4            | 1991,2            |          | 997,4    | 1494,3                         | 6850         | 5211              |
| 2009/2010       | 2234,9            | 2148,6            |          | 2405,0   | 2276,8                         | 9127         | 7446              |
| 2010/2011       | 2580,4            | 1798,3            |          | 1922,2   | 1860,3                         | 10987        | 10027             |
| 2011/2012       | 716,0             | 615,2             |          | 108,8    | 362,0                          | 11349        | 10743             |
| 2012/2013       | 2364,8            | 1954,9            |          | 1385,4   | 1670,2                         | 13019        | 13107             |
| 2013/2014       | 1584,0            | 1136,6            |          | 999,2    | 1067,9                         | 14087        | 14691             |

Tabela A4. 3 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Casa do Barreiro.

| Ano hidrológico | Posto com lacunas | Postos auxiliares |          |          |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Casa do Barreiro  | PU1               | PU5      | PU9      | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual          | P. Anual          | P. Anual | P. Anual |                                |              |                   |
| 2004/2005       | 1827,6            | 659,2             | 2383,4   | 1259,0   | 1433,9                         | 1434         | 1828              |
| 2005/2006       | 1873,0            | 1445,2            | 2837,4   | 1371,6   | 1884,7                         | 3319         | 3701              |
| 2006/2007       | 1396,4            | 1061,4            | 1591,9   | 752,6    | 1135,3                         | 4454         | 5097              |
| 2007/2008       | 1344,8            | 679,1             | 1475,4   | 886,6    | 1013,7                         | 5468         | 6442              |
| 2008/2009       | 1991,2            | 1366,4            | 1995,6   | 997,4    | 1453,1                         | 6921         | 8433              |
| 2009/2010       | 2148,6            | 2234,9            | 1865,7   | 2405,0   | 2168,5                         | 9089         | 10582             |
| 2010/2011       | 1798,3            | 2580,4            | 1125,7   | 1922,2   | 1876,1                         | 10965        | 12380             |
| 2011/2012       | 615,2             | 716,0             | 817,0    | 108,8    | 547,3                          | 11513        | 12995             |
| 2012/2013       | 1954,9            | 2364,8            | 3057,4   | 1385,4   | 2269,2                         | 13782        | 14950             |
| 2013/2014       | 1136,6            | 1584,0            | 1620,4   | 999,2    | 1401,2                         | 15183        | 16087             |

Tabela A4. 4 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Casa Velha.

| Ano hidrológico | Posto com lacunas | Postos auxiliares |          |          |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Casa Velha        | PU2               | PU3      | PU5      | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual          | P. Anual          | P. Anual | P. Anual |                                |              |                   |
| 2009/2010       | 2897,1            | 2234,9            | 2148,6   | 1958,8   | 2114,1                         | 2114         | 2897              |
| 2010/2011       | 3265,4            | 2580,4            | 1798,3   | 2874,6   | 2417,8                         | 4532         | 6162              |
| 2011/2012       | 1091,2            | 716,0             | 615,2    | 1302,0   | 877,7                          | 5410         | 7254              |
| 2012/2013       | 580,6             | 2364,8            | 1954,9   | 2456,8   | 2258,8                         | 7668         | 7834              |
| 2013/2014       | 1685,8            | 1584,0            | 1136,6   | 2331,1   | 1683,9                         | 9352         | 9520              |

**Tabela A4. 5 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Chão das Feiteiras.**

| Ano hidrológico | Posto com lacunas  | Postos auxiliares |              |              |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Chão das Feiteiras | PU3 P. Anual      | PU4 P. Anual | PU7 P. Anual | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual           |                   |              |              |                                |              |                   |
| 2009/2010       | 1958,8             | 2148,6            | 2897,1       | 2471,2       | 2505,6                         | 2506         | 1959              |
| 2010/2011       | 2874,6             | 1798,3            | 3265,4       | 1951,3       | 2338,3                         | 4844         | 4833              |
| 2011/2012       | 1302,0             | 615,2             | 1091,2       | 325,2        | 677,2                          | 5521         | 6135              |
| 2012/2013       | 2456,8             | 1954,9            | 580,6        | 2541,3       | 1692,3                         | 7213         | 8592              |
| 2013/2014       | 2331,1             | 1136,6            | 1685,8       | 1712,2       | 1511,5                         | 8725         | 10923             |

**Tabela A4. 6 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Curral das Freiras.**

| Ano Hidrológico | Posto com lacunas  | Postos auxiliares |              |              |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Curral das Freiras | PU1 P. Anual      | PU7 P. Anual | PU9 P. Anual | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual           |                   |              |              |                                |              |                   |
| 2004/2005       | 2383,4             | 1827,6            |              | 1259,0       | 1543,3                         | 1543         | 2383              |
| 2005/2006       | 2837,4             | 1873,0            |              | 1371,6       | 1622,3                         | 3166         | 5221              |
| 2006/2007       | 1591,9             | 1396,4            |              | 752,6        | 1074,5                         | 4240         | 6813              |
| 2007/2008       | 1475,4             | 1344,8            |              | 886,6        | 1115,7                         | 5356         | 8288              |
| 2008/2009       | 1995,6             | 1991,2            |              | 997,4        | 1494,3                         | 6850         | 10284             |
| 2009/2010       | 1865,7             | 2148,6            |              | 2405,0       | 2276,8                         | 9127         | 12149             |
| 2010/2011       | 1125,7             | 1798,3            |              | 1922,2       | 1860,3                         | 10987        | 13275             |
| 2011/2012       | 817,0              | 615,2             |              | 108,8        | 362,0                          | 11349        | 14092             |
| 2012/2013       | 3057,4             | 1954,9            |              | 1385,4       | 1670,2                         | 13019        | 17150             |
| 2013/2014       | 1620,4             | 1136,6            |              | 999,2        | 1067,9                         | 14087        | 18770             |

Tabela A4. 7 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Fajã da Nogueira.

| Ano hidrológico | Posto com lacunas | Postos auxiliares |          |          |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Fajã da Nogueira  | PU1               | PU5      | PU6      | P. Média dos postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual          | P. Anual          | P. Anual | P. Anual |                                |              |                   |
| 2007/2008       | 1310,1            | 1852,6            | 1374,4   | 1475,4   | 1567,5                         | 1567         | 1310              |
| 2008/2009       | 2148,1            | 2817,6            | 3231,8   | 1995,6   | 2681,7                         | 4249         | 3458              |
| 2009/2010       | 2471,2            | 3088,4            | 1958,8   | 1865,7   | 2304,3                         | 6553         | 5929              |
| 2010/2011       | 1951,3            | 252,0             | 2874,6   | 1125,7   | 1417,4                         | 7971         | 7881              |
| 2011/2012       | 325,2             | 1033,0            | 1302,0   | 817,0    | 1050,7                         | 9022         | 8206              |
| 2012/2013       | 2541,3            | 3400,6            | 2456,8   | 3057,4   | 2971,6                         | 11993        | 10747             |
| 2013/2014       | 1712,2            | 1736,0            | 2331,1   | 1620,4   | 1895,8                         | 13889        | 12459             |

Tabela A4. 8 – Dados para construção do gráfico duplamente acumulado para a análise qualidade de dados do posto Trapiche.

| Ano hidrológico | Posto com lacunas | Postos Auxiliares |          |          |                                |              | Posto com lacunas |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                 | Trapiche          | PU1               | PU2      | PU3      | P. Média dos Postos auxiliares | P. Acumulada | P. Acumulada      |
|                 | P. Anual          | P. Anual          | P. Anual | P. Anual |                                |              |                   |
| 2004/2005       | 1259,0            | 659,2             | 1827,6   | 2383,4   | 1623,4                         | 1623         | 1259              |
| 2005/2006       | 1371,6            | 1445,2            | 1873,0   | 2837,4   | 2051,9                         | 3675         | 2631              |
| 2006/2007       | 752,6             | 1061,4            | 1396,4   | 1591,9   | 1349,9                         | 5025         | 3383              |
| 2007/2008       | 886,6             | 679,1             | 1344,8   | 1475,4   | 1166,4                         | 6192         | 4270              |
| 2008/2009       | 997,4             | 1366,4            | 1991,2   | 1995,6   | 1784,4                         | 7976         | 5267              |
| 2009/2010       | 2405,0            | 2234,9            | 2148,6   | 1865,7   | 2083,1                         | 10059        | 7672              |
| 2010/2011       | 1922,2            | 2580,4            | 1798,3   | 1125,7   | 1834,8                         | 11894        | 9594              |
| 2011/2012       | 108,8             | 716,0             | 615,2    | 817,0    | 716,1                          | 12610        | 9703              |
| 2012/2013       | 1385,4            | 2364,8            | 1954,9   | 3057,4   | 2459,1                         | 15069        | 11089             |
| 2013/2014       | 999,2             | 1584,0            | 1136,6   | 1620,4   | 1447,0                         | 16516        | 12088             |

**ANEXO A5 – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE NÃO EXCEDÊNCIA DO ANO HIDROLÓGICO 2009/2010**

**Tabela A5. 1 – Probabilidade de não excedência posto Achada Grande.**

| Achada Grande |                                  |    |    |   |          |
|---------------|----------------------------------|----|----|---|----------|
| ANO           | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j° | N  | i | F<br>(%) |
| 2010/2011     | 252                              | 1  | 10 | 8 | 73       |
| 2011/2012     | 1033                             | 2  |    |   |          |
| 2013/2014     | 1736                             | 3  |    |   |          |
| 2007/2008     | 1853                             | 4  |    |   |          |
| 2006/2007     | 1954                             | 5  |    |   |          |
| 2005/2006     | 2521                             | 6  |    |   |          |
| 2008/2009     | 2818                             | 7  |    |   |          |
| 2009/2010     | 3088                             | 8  |    |   |          |
| 2012/2013     | 3401                             | 9  |    |   |          |
| 2004/2005     | 3472                             | 10 |    |   |          |

**Tabela A5. 2 – Probabilidade de não excedência posto Camacha.**

| Camacha   |                                  |    |    |   |          |
|-----------|----------------------------------|----|----|---|----------|
| ANO       | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i | F<br>(%) |
| 2004/2005 | 659                              | 1  | 10 | 8 | 73       |
| 2007/2008 | 679                              | 2  |    |   |          |
| 2011/2012 | 716                              | 3  |    |   |          |
| 2006/2007 | 1061                             | 4  |    |   |          |
| 2008/2009 | 1366                             | 5  |    |   |          |
| 2005/2006 | 1445                             | 6  |    |   |          |
| 2013/2014 | 1584                             | 7  |    |   |          |
| 2009/2010 | 2235                             | 8  |    |   |          |
| 2012/2013 | 2365                             | 9  |    |   |          |
| 2010/2011 | 2580                             | 10 |    |   |          |

**Tabela A5. 3 – Probabilidade de não excedência posto Casa do Barreiro.**

| Casa do Barreiro |                                  |    |    |    |           |
|------------------|----------------------------------|----|----|----|-----------|
| ANO              | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i  | F.<br>(%) |
| 2011/2012        | 615                              | 1  | 10 | 10 | 91        |
| 2013/2014        | 1137                             | 2  |    |    |           |
| 2007/2008        | 1345                             | 3  |    |    |           |
| 2006/2007        | 1396                             | 4  |    |    |           |
| 2010/2011        | 1798                             | 5  |    |    |           |
| 2004/2005        | 1828                             | 6  |    |    |           |
| 2005/2006        | 1873                             | 7  |    |    |           |
| 2012/2013        | 1955                             | 8  |    |    |           |
| 2008/2009        | 1991                             | 9  |    |    |           |
| 2009/2010        | 2149                             | 10 |    |    |           |

**Tabela A5. 4 – Probabilidade de não excedência posto Casa Velha.**

| Casa Velha |                                  |   |   |   |          |
|------------|----------------------------------|---|---|---|----------|
| ANO        | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F<br>(%) |
| 2012/2013  | 581                              | 1 | 5 | 4 | 67       |
| 2011/2012  | 1091                             | 2 |   |   |          |
| 2013/2014  | 1686                             | 3 |   |   |          |
| 2009/2010  | 2897                             | 4 |   |   |          |
| 2010/2011  | 3265                             | 5 |   |   |          |

**Tabela A5. 5 – Probabilidade de não excedência  
posto Chão das Feiteiras.**

| Chão das Feiteiras |                                  |   |   |   |          |
|--------------------|----------------------------------|---|---|---|----------|
| ANO                | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F<br>(%) |
| 2011/2012          | 1302                             | 1 | 7 | 3 | 38       |
| 2007/2008          | 1374                             | 2 |   |   |          |
| 2009/2010          | 1959                             | 3 |   |   |          |
| 2013/2014          | 2331                             | 4 |   |   |          |
| 2012/2013          | 2457                             | 5 |   |   |          |
| 2010/2011          | 2875                             | 6 |   |   |          |
| 2008/2009          | 3232                             | 7 |   |   |          |

**Tabela A5. 6 – Probabilidade de não excedência  
posto Curral das Freiras.**

| Curral das Freiras |                                  |    |    |   |          |
|--------------------|----------------------------------|----|----|---|----------|
| ANO                | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i | F<br>(%) |
| 2011/2012          | 817                              | 1  | 10 | 6 | 55       |
| 2010/2011          | 1126                             | 2  |    |   |          |
| 2007/2008          | 1475                             | 3  |    |   |          |
| 2006/2007          | 1592                             | 4  |    |   |          |
| 2013/2014          | 1620                             | 5  |    |   |          |
| 2009/2010          | 1866                             | 6  |    |   |          |
| 2008/2009          | 1996                             | 7  |    |   |          |
| 2004/2005          | 2383                             | 8  |    |   |          |
| 2005/2006          | 2837                             | 9  |    |   |          |
| 2012/2013          | 3057                             | 10 |    |   |          |

**Tabela A5. 7 – Probabilidade de não excedência  
posto Fajã da Nogueira.**

| Fajã da Nogueira |                                  |   |   |   |        |
|------------------|----------------------------------|---|---|---|--------|
| ANO              | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F<br>% |
| 2011/2012        | 325                              | 1 | 7 | 6 | 75     |
| 2007/2008        | 1310                             | 2 |   |   |        |
| 2013/2014        | 1712                             | 3 |   |   |        |
| 2010/2011        | 1951                             | 4 |   |   |        |
| 2008/2009        | 2148                             | 5 |   |   |        |
| 2009/2010        | 2471                             | 6 |   |   |        |
| 2012/2013        | 2541                             | 7 |   |   |        |

**Tabela A5. 8 – Probabilidade de não excedência  
posto Trapiche.**

| Trapiche  |                                  |    |    |    |     |
|-----------|----------------------------------|----|----|----|-----|
| ANO       | P. anual<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i  | F % |
| 2011/2012 | 109                              | 1  | 10 | 10 | 91  |
| 2006/2007 | 753                              | 2  |    |    |     |
| 2007/2008 | 887                              | 3  |    |    |     |
| 2008/2009 | 997                              | 4  |    |    |     |
| 2013/2014 | 999                              | 5  |    |    |     |
| 2004/2005 | 1259                             | 6  |    |    |     |
| 2005/2006 | 1372                             | 7  |    |    |     |
| 2012/2013 | 1385                             | 8  |    |    |     |
| 2010/2011 | 1922                             | 9  |    |    |     |
| 2009/2010 | 2405                             | 10 |    |    |     |

## ANEXO A6 – DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA PARA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA ANUAL

**Tabela A6. 1 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Achada Grande.**

| Achada Grande |                              |    |    |    |          |
|---------------|------------------------------|----|----|----|----------|
| ANO           | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i  | F<br>(%) |
| 2010/2011     | 53                           | 1  | 10 | 10 | 91       |
| 2011/2012     | 76                           | 2  |    |    |          |
| 2005/2006     | 115                          | 3  |    |    |          |
| 2006/2007     | 135                          | 4  |    |    |          |
| 2008/2009     | 212                          | 5  |    |    |          |
| 2013/2014     | 241                          | 6  |    |    |          |
| 2007/2008     | 272                          | 7  |    |    |          |
| 2012/2013     | 279                          | 8  |    |    |          |
| 2004/2005     | 289                          | 9  |    |    |          |
| 2009/2010     | 334                          | 10 |    |    |          |

**Tabela A6. 2 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Camacha.**

| Camacha   |                              |    |    |    |          |
|-----------|------------------------------|----|----|----|----------|
| ANO       | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i  | F<br>(%) |
| 2004/2005 | 18                           | 1  | 10 | 10 | 91       |
| 2005/2006 | 61                           | 2  |    |    |          |
| 2011/2012 | 64                           | 3  |    |    |          |
| 2006/2007 | 102                          | 4  |    |    |          |
| 2008/2009 | 104                          | 5  |    |    |          |
| 2013/2014 | 150                          | 6  |    |    |          |
| 2007/2008 | 189                          | 7  |    |    |          |
| 2010/2011 | 209                          | 8  |    |    |          |
| 2012/2013 | 283                          | 9  |    |    |          |
| 2009/2010 | 351                          | 10 |    |    |          |

**Tabela A6. 3 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Casa do Barreiro.**

| Casa do Barreiro |                              |   |   |   |           |
|------------------|------------------------------|---|---|---|-----------|
| ANO              | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F.<br>(%) |
| 2010/2011        | 38                           | 1 | 9 | 9 | 90        |
| 2011/2012        | 55                           | 2 |   |   |           |
| 2005/2006        | 89                           | 3 |   |   |           |
| 2013/2014        | 127                          | 4 |   |   |           |
| 2004/2005        | 131                          | 5 |   |   |           |
| 2006/2007        | 141                          | 6 |   |   |           |
| 2008/2009        | 142                          | 7 |   |   |           |
| 2007/2008        | 257                          | 8 |   |   |           |
| 2009/2010        | 331                          | 9 |   |   |           |

**Tabela A6. 4 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Casa Velha.**

| Casa Velha |                              |   |   |   |          |
|------------|------------------------------|---|---|---|----------|
| ANO        | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F<br>(%) |
| 2011/2012  | 55                           | 1 | 5 | 5 | 83       |
| 2012/2013  | 62                           | 2 |   |   |          |
| 2013/2014  | 209                          | 3 |   |   |          |
| 2010/2011  | 233                          | 4 |   |   |          |
| 2009/2010  | 371                          | 5 |   |   |          |

**Tabela A6. 5 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Chão das Feiteiras.**

| Chão das Feiteiras |                              |   |   |   |          |
|--------------------|------------------------------|---|---|---|----------|
| ANO                | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F<br>(%) |
| 2011/2012          | 86                           | 1 | 6 | 4 | 57       |
| 2007/2008          | 182                          | 2 |   |   |          |
| 2008/2009          | 260                          | 3 |   |   |          |
| 2009/2010          | 267                          | 4 |   |   |          |
| 2010/2011          | 412                          | 5 |   |   |          |
| 2012/2013          | 430                          | 6 |   |   |          |

**Tabela A6. 6 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Curral das Freiras.**

| Curral das FreirasS |                              |    |    |    |          |
|---------------------|------------------------------|----|----|----|----------|
| ANO                 | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i  | F<br>(%) |
| 2011/2012           | 68                           | 1  | 10 | 10 | 91       |
| 2006/2007           | 121                          | 2  |    |    |          |
| 2007/2008           | 130                          | 3  |    |    |          |
| 2013/2014           | 134                          | 4  |    |    |          |
| 2004/2005           | 150                          | 5  |    |    |          |
| 2005/2006           | 173                          | 6  |    |    |          |
| 2010/2011           | 192                          | 7  |    |    |          |
| 2012/2013           | 262                          | 8  |    |    |          |
| 2008/2009           | 326                          | 9  |    |    |          |
| 2009/2010           | 386                          | 10 |    |    |          |

**Tabela A6. 7 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Fajã da Nogueira.**

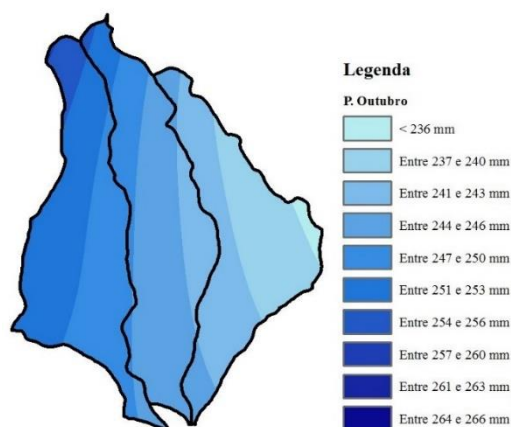
| Fajã da Nogueira |                              |   |   |   |        |
|------------------|------------------------------|---|---|---|--------|
| ANO              | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j | N | i | F<br>% |
| 2011/2012        | 61                           | 1 | 7 | 7 | 88     |
| 2008/2009        | 107                          | 2 |   |   |        |
| 2013/2014        | 141                          | 3 |   |   |        |
| 2007/2008        | 290                          | 4 |   |   |        |
| 2012/2013        | 316                          | 5 |   |   |        |
| 2010/2011        | 318                          | 6 |   |   |        |
| 2009/2010        | 385                          | 7 |   |   |        |

**Tabela A6. 8 – Probabilidade de não excedência da Pdma posto Trapiche.**

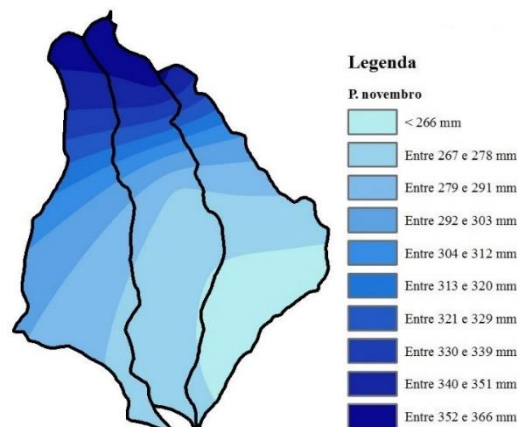
| Trapiche  |                              |    |    |    |     |
|-----------|------------------------------|----|----|----|-----|
| ANO       | Pdma<br>(ordem<br>crescente) | j  | N  | i  | F % |
| 2011/2012 | 20                           | 1  | 10 | 10 | 91  |
| 2005/2006 | 71                           | 2  |    |    |     |
| 2006/2007 | 77                           | 3  |    |    |     |
| 2013/2014 | 108                          | 4  |    |    |     |
| 2008/2009 | 110                          | 5  |    |    |     |
| 2004/2005 | 117                          | 6  |    |    |     |
| 2007/2008 | 149                          | 7  |    |    |     |
| 2010/2011 | 207                          | 8  |    |    |     |
| 2012/2013 | 238                          | 9  |    |    |     |
| 2009/2010 | 340                          | 10 |    |    |     |



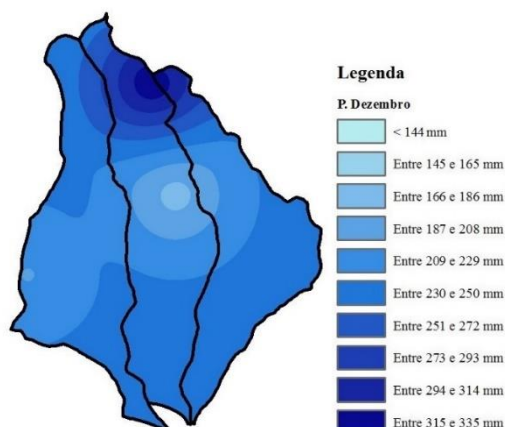
## ANEXO A7 – VARIAÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL



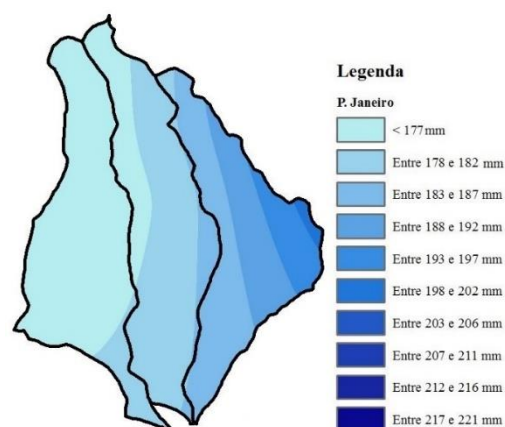
**Figura A7. 1 – Variação espacial da precipitação média para os meses de outubro.**



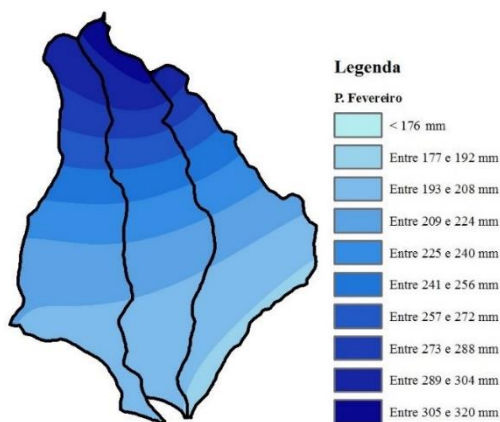
**Figura A7. 2 – Variação espacial da precipitação média para os meses de novembro.**



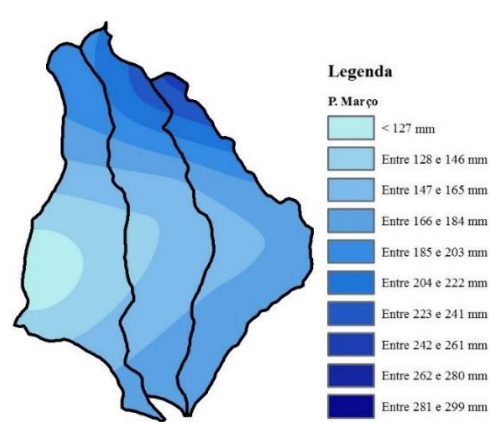
**Figura A7. 3 – Variação espacial da precipitação média para os meses de dezembro.**



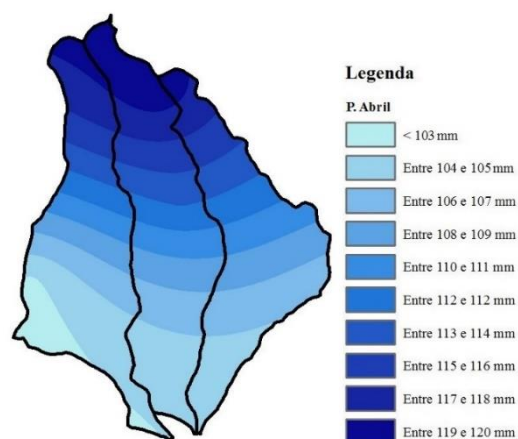
**Figura A7. 4 – Variação espacial da precipitação média para os meses de janeiro.**



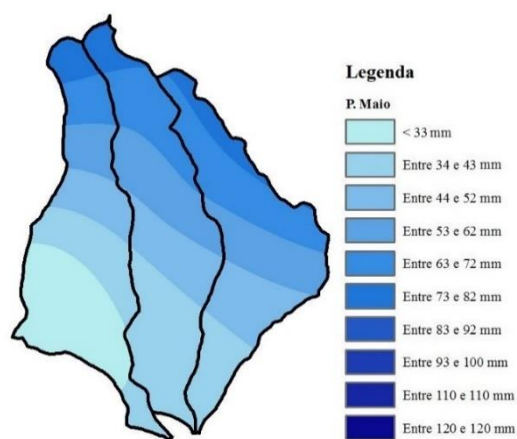
**Figura A7. 5 – Variação espacial da precipitação média para os meses de fevereiro.**



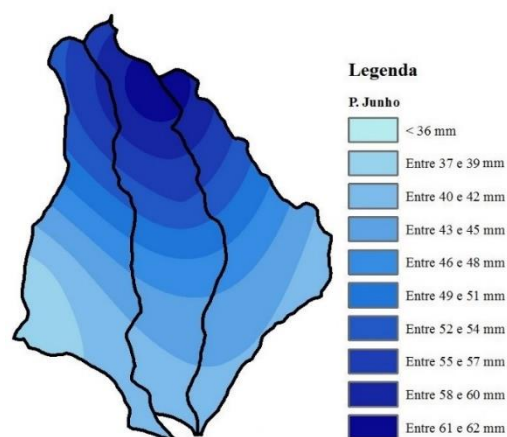
**Figura A7. 6 – Variação espacial da precipitação média para os meses de março.**



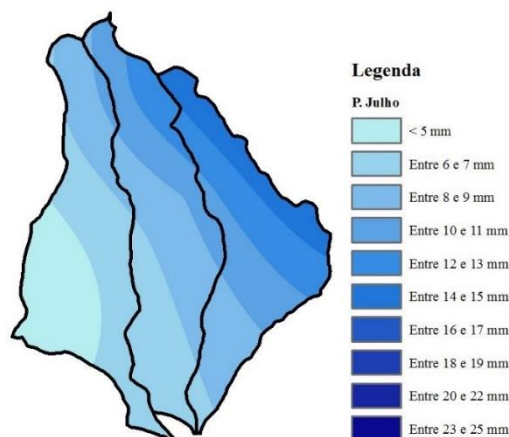
**Figura A7. 7 – Variação espacial da precipitação média para os meses de abril.**



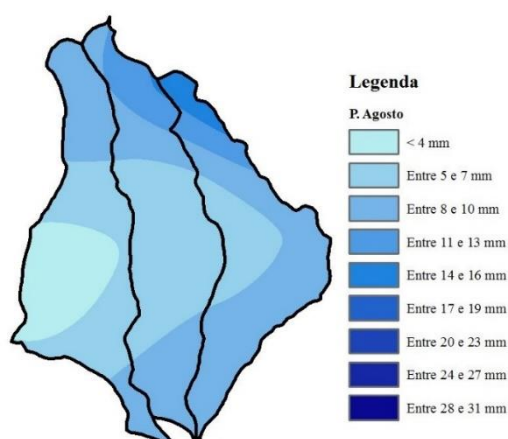
**Figura A7. 8 – Variação espacial da precipitação média para os meses de maio.**



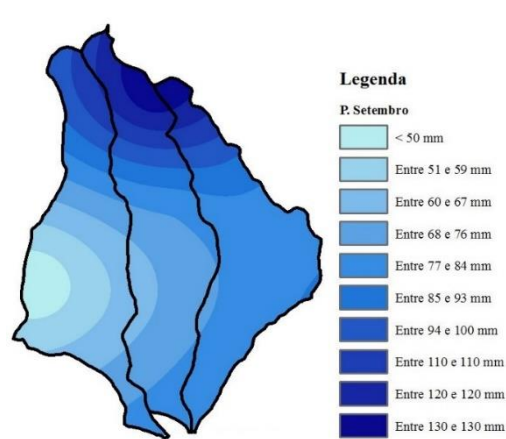
**Figura A7. 9 – Variação espacial da precipitação média para os meses de junho.**



**Figura A7. 10 – Variação espacial da precipitação média para os meses de julho.**



**Figura A7. 11 – Variação espacial da precipitação média para os meses de agosto.**



**Figura A7. 12 – Variação espacial da precipitação média para os meses de setembro.**