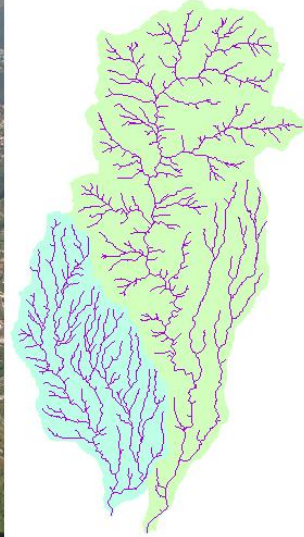




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Caracterização hidráulica, hidrológica e do transporte sólido das principais linhas de água (ribeiras) do concelho de Câmara de Lobos - ilha da Madeira

JOÃO MIGUEL BARROS MARQUES
Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Área de Especialização de Hidráulica

Orientadores:

Mestre Alexandre Almeida Mendes Borga
Doutor Sérgio António Neves Lousada

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais:

Licenciado Luís Carlos Pais Vaz Tecedeiro
Mestre Alexandre Almeida Mendes Borga
Doutor Sérgio António Neves Lousada

Dezembro de 2014

Agradecimentos

Para a realização desta dissertação não podia deixar de exprimir o meu profundo agradecimento a todos os que contribuíram para que este trabalho fosse possível:

Aos meus orientadores, o Engenheiro Alexandre Borga e ao Doutor Sérgio Lousada, quer pela sua disponibilidade, motivação e incentivo, quer pelos conhecimentos transmitidos ao longo desta dissertação.

À Direção de Serviços de Informação Geográfica e Cadastro da Região Autónoma da Madeira, por terem disponibilizado os Modelos Digitais de Terreno necessários para realizar o meu trabalho.

Aos meus amigos e colegas, que direta ou indiretamente, contribuíram com apoio e ajuda. A todos gostaria de deixar o meu muito obrigado, em especial aqueles com quem convivi e me deram muita força nesta última etapa.

Por último, o meu mais sincero e profundo agradecimento à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, pela motivação, paciência e apoio que sempre me transmitiram, pois sem eles não teria chegado onde cheguei.

Resumo

O presente trabalho final de mestrado tem como principais objetivos, a caracterização da vertente hidráulica e hidrológica das bacias hidrográficas relativas à ribeira dos Socorridos e à ribeira do Vigário do concelho de Câmara de Lobos - ilha da Madeira, sendo feita uma abordagem de forma teórica do transporte sólido nestas linhas de água e possíveis medidas de correção torrencial.

Numa primeira fase, procedeu-se à descrição geral das características climáticas, hidrográficas, geológicas e hidrológicas da ilha da Madeira. Nesta fase inicial também se referiram outros aspetos importantes como o relevo, o solo e situações de risco.

Posteriormente fez-se o enquadramento geográfico das bacias hidrográficas, tendo sempre em atenção o contexto anterior da caracterização de toda a Ilha, processou-se a caracterização dos mesmos aspetos mas de uma forma mais particular, isto é, cada uma das linhas de água em análise. Posto isto, e com recurso aos modelos digitais do terreno é feita toda uma exaustiva caracterização a ambas as bacias hidrográficas, a partir da qual foi possível obter os dados relativos às características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem.

Subsequentemente fez-se referência ao transporte sólido, contudo, este, revela-se extremamente complicado de caracterizar e contabilizar, logo em função desse pressuposto foram apresentadas um conjunto de medidas de correção torrencial de forma a prevenir/minimizar este fenómeno.

Por fim expôs-se as conclusões, bem como algumas considerações finais, logo apresenta-se uma listagem de objetivos a manter ou alcançar nos próximos anos, onde se incluem ações prioritárias e recomendações visando, não só, melhorar o processo de caracterização das bacias hidrográficas, bem como, simplificar a caracterização e contabilização do transporte sólido.

Palavras-Chave:

Bacia Hidrográfica; Câmara de Lobos; Ribeira dos Socorridos; Ribeira do Vigário; Hidrologia; *ArcGis*; Análise morfológica; Transporte sólido

Abstract

The main objective of this final master thesis is the characterization of hydraulic and hydrologic aspects of drainage basins of ribeira dos Socorridos and ribeira do Vigário from Câmara de Lobos - Madeira Island. Moreover, a theoretical approach was made to the sediment transport in these streams and possible measures for torrential correction.

Initially, a general description was made of climate, hydrographic, geological and hydrological characteristics of Madeira Island. At this early stage it was mentioned other important aspects such as relief, soil and hazardous situations.

Later the geographical framing of drainage basins was made, keeping in mind the context of the previous characterization of the entire Island. The characterization of the same aspects was proceed but in a more particular way, that is, for each one of the streams in analysis. After this and with use of digital terrain models an exhaustive characterization of both drainage basins was made. This made it possible to obtain data relative to the geometric, relief and drainage network characteristics.

Subsequently a reference to the sediment transport was made, however, this proved to be extremely difficult to characterize and account. Consequently a set of torrential correction measures were presented to prevent/minimize this phenomenon, based on this assumption.

Finally it sets out the conclusions and final considerations, which led to a list of goals to maintain or achieve in the coming years. This includes priority actions and recommendations not only to improve the process of characterization of drainage basins, but also to simplify the characterization and accounting of sediment transport.

Keywords:

Drainage basin; Câmara de Lobos; Ribeira dos Socorridos; Ribeira do Vigário; Hydrology; *ArcGis*; Morphological Analysis; Sediment transport

Índice

Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura do Trabalho Final de Mestrado	4
Capítulo 2: Caracterização da ilha da Madeira	5
2.1 Localização geográfica	6
2.2 Clima.....	7
2.3 Rede Hidrográfica.....	11
2.4 Geologia.....	15
2.5 Geomorfologia	16
2.6 Hidrologia e Hidrogeologia	19
2.7 Relevo	21
2.8 Solos.....	22
2.9 Vegetação e Uso do Solo	25
2.10 Situações de Risco	26
2.10.1 Alterações Climáticas	26
2.10.2 Cheias.....	27
2.10.3 Secas	28
2.10.4 Erosão Hídrica	29
2.10.5 Erosão Costeira	30
2.10.6 Transporte Sólido e Movimentos de Massa de Vertentes.....	30
Capítulo 3: Caracterização das principais linhas de água (ribeiras)	33
3.1 Localização geográfica	34
3.2 Características Fisiográficas	35
3.2.1 Caracterização climática	35
3.2.2 Caracterização geológica	37
3.2.3 Caracterização dos solos	39
3.3 Características Geométricas.....	41
3.3.1 Metodologia	41
3.3.2 Delimitação da bacia hidrográfica e da rede de drenagem	41

3.3.3	Área e Perímetro da bacia hidrográfica	45
3.3.4	Fatores relacionados com a forma da bacia hidrográfica.....	46
3.4	Características do Relevo.....	49
3.4.1	Curva hipsométrica	49
3.4.2	Curva hipsométrica adimensional.....	52
3.4.3	Perfil longitudinal dos cursos de água principal	54
3.4.4	Declive médio do curso de água principal.....	56
3.4.5	Declive Equivalente do curso de água principal.....	56
3.4.6	Declive 10-85 do curso de água principal.....	57
3.4.7	Índice de Relevo	57
3.4.8	Declive médio da bacia.....	58
3.5	Características da rede de drenagem.....	59
3.5.1	Rede de drenagem.....	59
3.5.2	Hierarquização pelo método de Strahler.....	59
3.5.3	Hierarquização pelo método de Shreve	61
3.5.4	Relação de bifurcação	63
3.5.5	Tempo de Concentração	64
3.5.6	Densidade de drenagem	65
3.5.7	Percurso médio sobre o terreno.....	66
3.5.8	Densidade hídrica.....	66
3.6	Resumo das características das bacias hidrográficas.....	67
3.7	Precipitação anual média	68
3.8	Escoamento anual médio	70
3.9	Caudal de ponta de cheia	71
3.9.1	Coefficiente de escoamento C.....	72
3.9.2	Intensidade i.....	73
3.9.3	Aplicação do método racional	74
Capítulo 4: Transporte sólido e medidas de correção torrencial.....		75
4.1	Introdução	76
4.2	Caracterização do transporte sólido.....	78
4.3	Medidas de correção torrencial em bacias hidrográficas.....	79
4.3.1	Barragens	79
4.3.2	Soleiras transversais.....	81

4.3.3	Esporões	82
4.3.4	Açudes.....	83
4.3.5	Revestimento do fundo e das margens.....	85
Capítulo 5: Conclusões		87
5.1	Conclusões	88
5.2	Considerações finais e desenvolvimentos futuros	89
Referências Bibliográficas		91
Anexos		95
Anexo 1		
Anexo 2		
Anexo 3		

Índice de figuras

Figura 1 - Organograma da metodologia adotada.....	3
Figura 2 - Localização geográfica da ilha da Madeira.....	6
Figura 3 - Temperatura média do ar na ilha da Madeira.....	8
Figura 4 - Insolação média anual no Funchal	9
Figura 5 – Precipitação anual média na ilha da Madeira	9
Figura 6 - Valores médios anuais do vento no Funchal.....	10
Figura 7 - Classificação climática pelo índice hídrico segundo Thornthwaire.....	11
Figura 8 - Rede Hidrográfica Principal da ilha da Madeira.....	12
Figura 9 - Carta Geológica da ilha da Madeira.....	15
Figura 10 - Unidades vulcano-estratigráficas principais	16
Figura 11 - Cabo Girão	17
Figura 12 - Unidades Geomorfológicas Clássicas	18
Figura 13 - Enquadramento Hidrogeológico da ilha da Madeira	20
Figura 14 - Modelo Hidrogeológico da ilha da Madeira	21
Figura 15 - Carta de Declives da ilha da Madeira	22
Figura 16 - Carta de Solos da Madeira	24
Figura 17 - Ocupação do Solo na ilha da Madeira.....	25
Figura 18 - Frequência de secas na ilha da Madeira entre 1941/42 e 1990/91	28
Figura 19 - Zonas de maior risco de erosão hídrica na ilha da Madeira.....	29
Figura 20 - Desabamento na Penha d'Águia	31
Figura 21 - Localização das bacias hidrográficas analisadas.....	34
Figura 22 - Mapa isotérmico das bacias hidrográficas analisadas.....	35
Figura 23 - Mapa de isoietas das bacias hidrográficas analisadas	36
Figura 24 - Carta Geológica das bacias hidrográficas analisadas.....	37
Figura 25 - Carta de solos das bacias hidrográficas analisadas	40
Figura 26 - Modelo digital terrestre após o comando “Fill”.....	42

Figura 27 - Direção do escoamento depois de executar a ferramenta “ <i>Flow Direction</i> ” ..	43
Figura 28 - Pontos de maior acumulação de água após utilizar “ <i>Flow Accumulation</i> ”	44
Figura 29 - Delimitação e rede de drenagem das bacias hidrográficas analisadas	45
Figura 30 - Mapa hipsométrico das bacias hidrográficas	50
Figura 31 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos	51
Figura 32 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário	52
Figura 33 - Estado de maturidade de uma bacia hidrográfica	52
Figura 34 - Curva hipsométrica adimensional da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos	53
Figura 35 - Curva hipsométrica adimensional da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário	53
Figura 36 - Cursos de água principal das bacias hidrográficas.....	54
Figura 37 - Perfil longitudinal do curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos.....	55
Figura 38 - Perfil longitudinal do curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário	55
Figura 39 - Mapa de declives das bacias hidrográficas	58
Figura 40 - Exemplo de hierarquização pelo método de Strahler.....	60
Figura 41 - Hierarquização pelo método de Strahler nas bacias hidrográficas.....	60
Figura 42 - Exemplo da hierarquização pelo método de Shreve	62
Figura 43 - Hierarquização pelo método de Shreve nas bacias hidrográficas	62
Figura 44 - Exemplo da aplicação do método das isoietas	68
Figura 45 - Isolinhas de escoamento anual médio total	70
Figura 46 - Acumulação de sedimentos numa barragem.....	80
Figura 47 - Soleira transversal na ribeira do Vigário.....	81
Figura 48 - Esporão em betão	82
Figura 49 - Vários tipos de açudes.....	83
Figura 50 - Relação da taxa de diminuição de descarga de sedimentos, Q_r , e do espaçamento, $B / D_{máx}$, numa aluvião	84

Figura 51 - Açude localizado na ribeira de Santa Luzia (Funchal)84

Figura 52 - Revestimento do fundo e das margens da ribeira do Vigário85

Figura 53 - Área e Perímetro obtido através do software *ArcGis*

Índice de tabelas

Tabela 1 - Bacias / Cursos de Água Principais da ilha da Madeira	14
Tabela 2 - Grupos principais e unidades-solo.....	23
Tabela 3 - Outros tipos de terreno na ilha da Madeira.....	23
Tabela 4 - Principais eventos históricos de aluviões na ilha da Madeira.....	27
Tabela 5 - Valores da área e do perímetro das bacias hidrográficas analisadas	46
Tabela 6 - Principais características dos cursos de água principal	54
Tabela 7 - Declive médio das bacias hidrográficas	58
Tabela 8 - Dados da hierarquização pelo método de Strahler	61
Tabela 9 - Relação de bifurcação nas bacias hidrográficas	63
Tabela 10 - Tempo de concentração nas bacias hidrográficas.....	65
Tabela 11 - Resumo das características das bacias hidrográficas.....	67
Tabela 12 - Área correspondente ao intervalo de isoietas para cada uma das bacias hidrográficas	69
Tabela 13 – Precipitação anual média nas bacias hidrográficas	69
Tabela 14 - Valores do escoamento anual médio por área	71
Tabela 15 – Escoamento anual médio em ambas as bacias hidrográficas.....	71
Tabela 16 - Valores do coeficiente C da fórmula racional	72
Tabela 17 - Parâmetros, <i>a</i> e <i>b</i> , das curvas IDF de diferentes regiões	73
Tabela 18 - Caudal de ponta de cheia das bacias hidrográficas.....	74
Tabela 19 - Dados relativos à bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos	
Tabela 20 - Dados relativos à bacia hidrográfica da ribeira do Vigário	
Tabela 21 - Distância entre cotas no curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos	
Tabela 22 - Distância entre cotas no curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário	

Lista de abreviaturas e siglas

a - Aluviões

A - Área

AN - Andosols

ANu - Umbric Andosols

ANz - Vitric Andosols

AR - Arenosols

ARc - Calcaric Arenosols

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

b - Largura relativa ao índice de alongamento

b_{Socorridos} - Largura relativa ao índice de alongamento na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

CL - Calcisols

CLh - Haplic Calcisols

CLIMAAT - Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos

CM - Cambisols

CMd - Dystric Cambisols

CMe - Eutric Cambisols

CMu - Humic Cambisols

CMv - Vertic Cambisols

CMx - Chromic Cambisols

CVA - Complexo Vulcânico Antigo

CVA1 - Unidade do Porto da Cruz

CVA2 - Unidade dos Lameiros

CVI - Complexo Vulcânico Intermédio

CVI1 - Unidade da Encumeada

CVI2 - Unidade da Penha d'Águia

CVS - Complexo Vulcânico Superior

CVS1 - Unidade dos Lombos

CV2 - Unidade do Funchal

$D_{d \text{ Socorridos}}$ - Densidade de drenagem na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$D_{d \text{ Vigário}}$ - Densidade de drenagem na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

$D_{h \text{ Socorridos}}$ - Densidade hídrica na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$D_{h \text{ Vigário}}$ - Densidade hídrica na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

dmm - depósitos de movimento de massa

dv - Depósitos de vertente

FL - Fluviosols

FLd - Dystric Fluviosols

FLe - Eutric Fluviosols

$h_{\text{med Socorridos}}$ - Altura média na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$h_{\text{med Vigário}}$ - Altura média na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

i - Intensidade de precipitação

$i_{\text{eq Socorridos}}$ - Declive equivalente na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$i_{\text{eq Vigário}}$ - Declive equivalente na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

$i_{\text{med Socorridos}}$ - Declive médio na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$i_{\text{med Vigário}}$ - Declive médio na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

$i_{\text{relevo Socorridos}}$ - Índice de relevo na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$i_{\text{relevo Vigário}}$ - Índice de relevo na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

$i_{\text{Socorridos}}$ - Intensidade de precipitação na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$i_{\text{Vigário}}$ - Intensidade de precipitação na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

$i_{10-85 \text{ Socorridos}}$ - Declive 10-85 na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

$i_{10-85 \text{ Vigário}}$ - Declive 10-85 na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

K_C - Índice de compacidade de Gravelius

K_C Socorridos - Índice de compacidade de Gravelius na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

K_C Vigário - Índice de compacidade de Gravelius na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

K_F - Fator de forma

K_F Socorridos - Fator de forma na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

K_F Vigário - Fator de forma na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

K_L Socorridos - Índice de alongamento na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

K_L Vigário - Índice de alongamento na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

L - Comprimento relativo ao índice de alongamento

L Socorridos - Comprimento relativo ao índice de alongamento na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

L Vigário - Comprimento relativo ao índice de alongamento na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

LP – Leptosols

P - Perímetro

P - Precipitação anual média através do método das isoietas

PGRH10 - Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Arquipélago da Madeira

PH - Phaeozems

PHh - Haplic Phaeozems

P_L Socorridos - Percurso médio sobre o terreno na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

P_L Vigário - Percurso médio sobre o terreno na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

PRAM - Plano Regional da Água da Madeira

Q - Caudal de ponta de cheia através do método racional

RAM – Região Autónoma da Madeira

R_b - Relação de bifurcação

R_b Socorridos - Relação de bifurcação na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

R_b Vigário - Relação de bifurcação na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

SIAM - Scenarios, Impacts and Adaptation Measures

SIG - Sistema de Informação Geográfica

TAd - Terreno Acidentado Distrito

TAe - Terreno Acidentado Êutrico

t_c Témez - Fórmula de Témez

t_c Ven Te Chow - Fórmula de Ven Te Chow

t_c Giandotti - Fórmula de Giandotti

TRd - Terreno Rochoso Distrito

TRe - Terreno Rochoso Êutrico

UGRC - Unidade Geomorfológica Clássica

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

VR - Vertisols

VRe - Eutric Vertisols

Z_{eq} Socorridos - Altura equivalente na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

Z_{eq} Vigário - Altura equivalente na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

Z_{med} - Altitude média

Z_{med} Socorridos - Altitude média na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

Z_{med} Vigário - Altitude média na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

Capítulo 1:

Introdução

1.1 Enquadramento

Na ilha da Madeira não há rios, as linhas de água são denominadas por ribeiras. Estas ribeiras e os seus afluentes constituem uma bacia hidrográfica que é a unidade fundamental de aplicação prática da hidrologia. Bacia hidrográfica de um curso de água, relativa a uma determinada secção, define-se como a área desse terreno que contribui com as águas que ali se precipitam, para alimentar o caudal desse mesmo curso de água na secção considerada, cujo escoamento converge para uma secção única de saída.

Uma ribeira é um curso de água contínuo que apresenta normalmente durante todo o ano caudais pouco elevados, visto apresentar também uma bacia hidrográfica pequena. Estas bacias hidrográficas caracterizam-se por possuírem vales profundos, formados pela erosão das águas das chuvas, que ao fluírem até à foz, formam declives nos terrenos.

Devido a estes grandes declives e associado a uma forte precipitação podem ocorrer aluviões, nome pelo qual estes fenómenos são conhecidos na Madeira, apesar de num contexto científico ter o significado de depósito sedimentar, que originam um forte caudal, isto porque devido às vertentes íngremes vão ganhando força e velocidade, arrastando grandes volumes de material sólido, onde pode ocorrer o assoreamento e estrangulamento do canal, resultando o transbordamento dos canais de escoamento, transformando-se assim num fluxo altamente destrutivo.

A caracterização de uma bacia hidrográfica tem grande importância para o estudo do seu comportamento hidrológico. Desta forma, interessa caracterizar a bacia relativamente à geometria, sistema de drenagem, relevo, geologia, uso do solo e vegetação.

1.2 Objetivos

Este trabalho final de mestrado tem como objetivo primordial, tal como o próprio título indica, caracterizar as principais linhas de água (ribeiras) do concelho de Câmara de Lobos - ilha da Madeira. Esta análise será feita no âmbito da hidráulica, da hidrologia e do transporte sólido.

As principais ribeiras a serem analisadas serão a ribeira dos Socorridos e a ribeira do Vigário, porque são estas as mais representativas desde concelho, no que toca à sua área e perímetro.

Pretende-se assim, fazer uma pesquisa e recolha de dados, que posteriormente serão tratados, permitindo essa informação caracterizar as respetivas bacias hidrográficas, tendo em conta que existem diversos fatores que tornam cada bacia hidrográfica num sistema hidráulico e hidrológico distinto, consoante as suas características.

1.3 Metodologia

O presente trabalho final de mestrado foi desenvolvido de acordo com o organograma apresentado na figura 1, tendo-se iniciado por uma pesquisa e revisão bibliográfica, sobre a temática a ser abordada, seguida da elaboração de um inventário, onde foi feita uma análise visual às zonas em estudo, através de uma caracterização fotográfica (fotos e imagens), bem como, através da recolha e tratamento de mapas digitais terrestres através do software *ArcGis*, precedeu-se posteriormente à organização, tratamento e análise de todos os resultados/dados obtidos. Como etapa final, foram expostas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido.

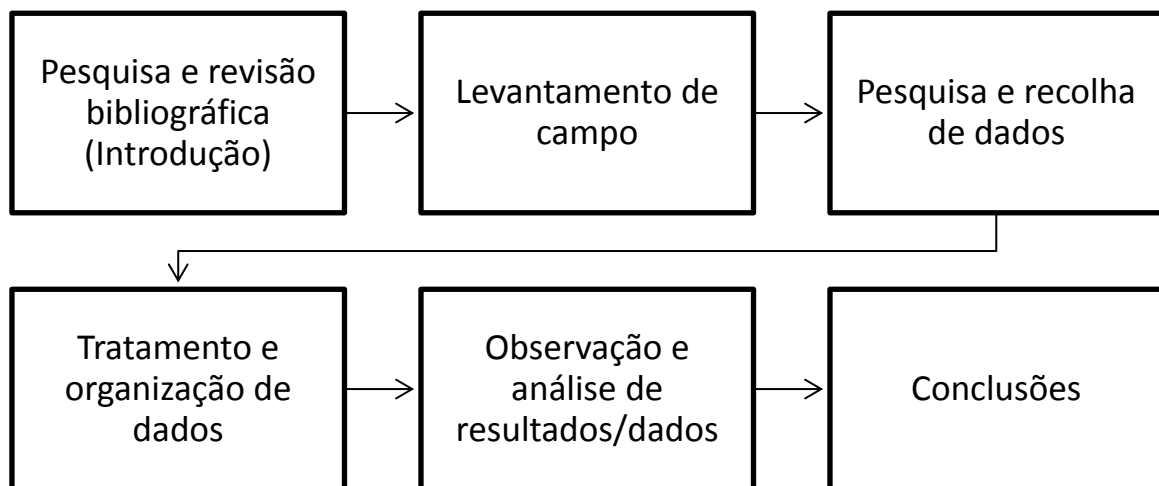


Figura 1 - Organograma da metodologia adotada

1.4 Estrutura do Trabalho Final de Mestrado

Este trabalho final de mestrado inclui 5 capítulos, cujo conteúdo é apresentado seguidamente de forma sumária:

O *Capítulo 1* é meramente introdutório. Realiza-se uma breve introdução sobre o tema, posteriormente apresenta-se os principais objetivos deste trabalho, com incidência sobre a metodologia e estrutura do trabalho final de mestrado.

O *Capítulo 2* dedica-se à caracterização da ilha da Madeira. Faz-se uma descrição geral da Ilha e das suas principais particularidades, nomeadamente a sua localização geográfica, clima, rede hidrográfica, geologia, geomorfologia, hidrologia, hidrogeologia, relevo, solos, vegetação e uso do solo. Também deu-se ênfase às situações de risco que assolam esta Ilha, tais como: alterações climáticas, cheias, secas, erosão hídrica, erosão costeira, fenómenos de transporte sólido e movimentos de massa de vertentes.

O *Capítulo 3* destina-se à caracterização das principais linhas de água em estudo, a ribeira dos Socorridos e a ribeira do Vigário. Numa primeira parte fez-se a localização geográfica, seguido da sua caracterização fisiográfica e geométrica, fez-se também um estudo relativamente ao relevo e às características da rede de drenagem. Apresenta-se também uma tabela resumo com todas as características que definem cada uma destas bacias hidrográficas. Neste capítulo faz-se referência à precipitação anual média, escoamento médio anual e ao cálculo do caudal de ponta de cheia para cada uma das ribeiras em estudo.

No *Capítulo 4* abordou-se o transporte sólido e a correção da torrencialidade. Fez-se uma abordagem mais teórica sobre o transporte sólido e de seguida uma abordagem a possíveis medidas de correção torrencial nestas bacias hidrográficas.

Por fim, no *Capítulo 5* expôs-se as conclusões, considerações finais e propostas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos sobre a temática, que poderão ser realizados futuramente, no seguimento do trabalho final de mestrado.

Em anexo, encontram-se de forma ordenada outros documentos criados no decorrer do trabalho final de mestrado.

Capítulo 2:

Caracterização da ilha da Madeira

2.1 Localização geográfica

A ilha da Madeira é a principal ilha do arquipélago da Madeira, do qual também fazem parte a ilha de Porto Santo, as ilhas Desertas e as ilhas Selvagens. O arquipélago da Madeira localiza-se no sector ocidental do Oceano Atlântico a cerca de 1000 km a sudoeste da Ponta de Sagres, entre os paralelos 30° 01' e 33° 08' N e os meridianos 15° 51' e 17° 16' W.

A ilha da Madeira é a maior ilha deste arquipélago, que apresenta uma orientação alongada de E-W com uma área de 742 km², seguida da ilha de Porto Santo que se localiza a pouco mais de 50 km a nordeste da ilha da Madeira, com uma área de 42,48 km². A sudoeste da ilha da Madeira ficam as ilhas Desertas, constituídas pela Deserta Grande, ilhéu Chão e a ilha do Bugio e que na totalidade têm uma área de 14,21 km². Por último, a cerca de 200 km a sul da ilha da Madeira ficam as ilhas Selvagens, compostas pela Selvagem Grande e pela Selvagem Pequena que perfazem uma área total de 2,73 km².

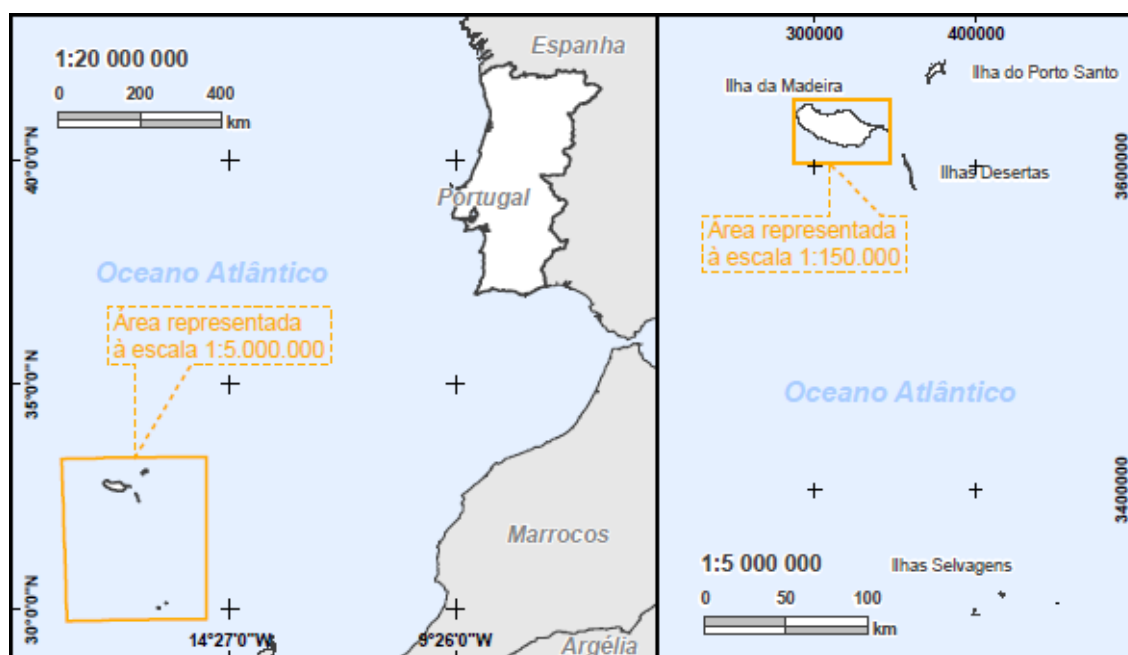


Figura 2 - Localização geográfica da ilha da Madeira

(Fonte: PGRH10, 2013)

2.2 Clima

O arquipélago da Madeira fica situado numa região subtropical, cujo clima é influenciado por fatores gerais, relacionados com a circulação atmosférica e a localização geográfica, e por fatores locais, como a exposição das vertentes e a morfologia e orientação do relevo. No que toca aos fatores gerais, merece especial atenção a situação oceânica (a influência da corrente do Golfo e a corrente das Canárias), os centros anticiclónicos continentais do noroeste de África e da Europa Ocidental e o anticiclone dos Açores. Este anticiclone é o que condiciona mais o clima do arquipélago da Madeira. A sua presença determina situações de calma atmosférica, céu limpo, ou nuvens de fraco desenvolvimento vertical, sem capacidade para originar chuvas. Esta acalmia é afetada quando alguns sistemas depressionários que atravessam o Atlântico, influenciados pelo anticiclone da Europa Ocidental, originam depressões entre o arquipélago da Madeira e Portugal Continental, podendo provocar fortes e abundantes precipitações. Quanto aos fatores locais, segundo Ferreira (1955), “o clima da Madeira é paradigmático e correspondente ao grupo climático Mediterrânico, os quais determinam uma zonagem climática altitudinal e demarcada.” (Georisco, 2011)

Como é possível examinar na figura 3, verifica-se uma regularidade térmica significativa. Na ilha da Madeira a temperatura média anual do ar varia entre os 8°C e os 19°C, verificando-se os valores mais altos nas zonas costeiras, particularmente a sul.

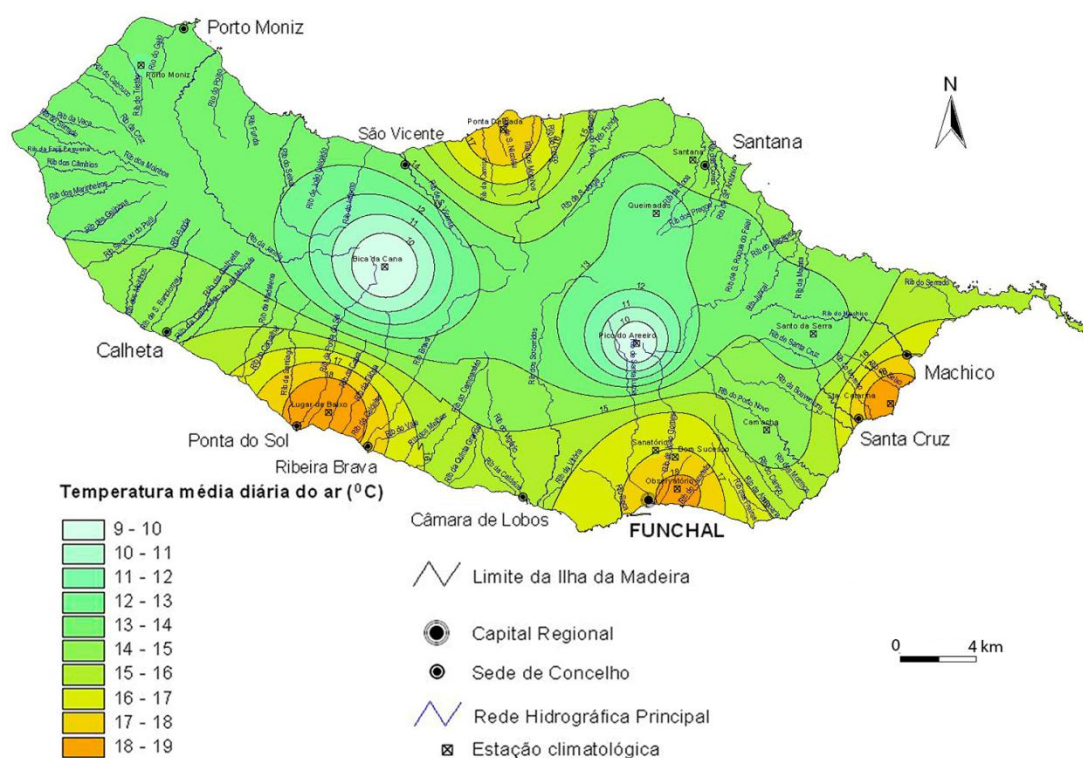


Figura 3 - Temperatura média do ar na ilha da Madeira

(Fonte: PRAM, 2003)

Os meses mais quentes são os de agosto e setembro. No inverno, a média das temperaturas mínimas desce até aos 4°C nas regiões de maior altitude, sendo superior a 13°C junto à costa. No verão, a temperatura atinge nos picos mais elevados a média de 16°C, sendo superior a 23°C nas zonas costeiras (PGRH10, 2013).

A humidade relativa do ar na Madeira, às 9 horas (hora a que se considera o valor representativo da humidade média diária), raramente excede os 75% nos meses de inverno, exceto nas estações de Porto Moniz e Areiro, onde varia entre os 80% e 85% devido ao efeito orográfico. Nos meses de verão a humidade relativa desce, em particular no mês de julho, chegando a atingir o mínimo de 60% na estação do Areiro, sendo o local onde se verifica maior variação intra-anual da humidade relativa (PGRH10, 2013).

A insolação mensal média como se pode observar na figura 4, apresenta valores mais elevados na estação do Funchal no mês de agosto com 240 horas, seguido de julho com 228 horas de exposição solar (PGRH10, 2013).

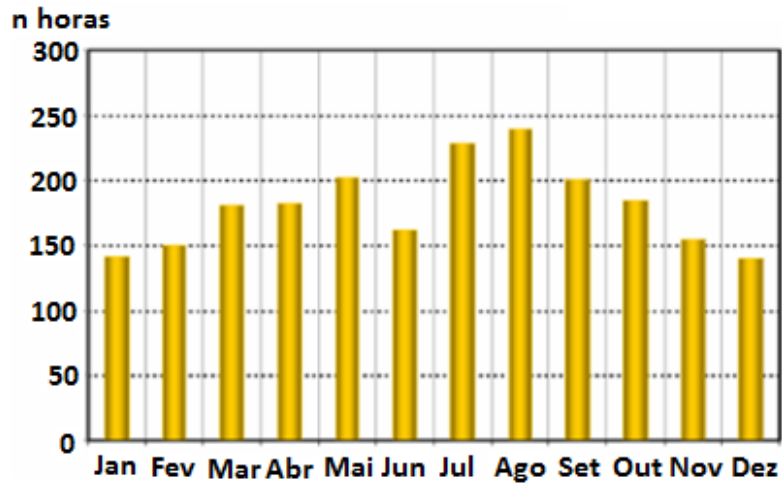


Figura 4 - Insolação média anual no Funchal

(Fonte: Adaptado do Instituto de Meteorologia)

A precipitação anual média na Madeira é de 1626 mm. Estes valores podem variar entre um máximo próximo dos 3400 mm nos picos mais elevados e um mínimo de 500 mm na baixa do Funchal. Na zona central e noroeste da Ilha é possível assinalar uma forte correlação entre a altimetria do terreno e a precipitação estimada (figura 5).

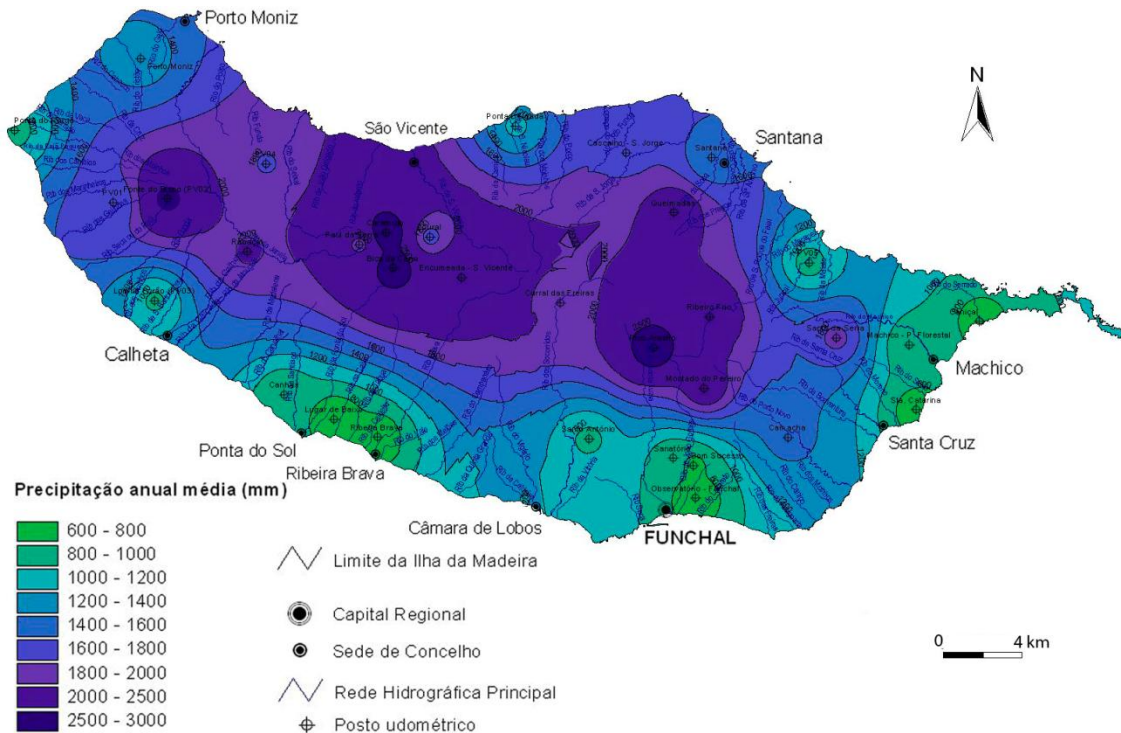


Figura 5 – Precipitação anual média na ilha da Madeira

(Fonte: PRAM, 2003)

A evapotranspiração potencial média na ilha da Madeira varia entre os 600 mm e 910 mm, sendo o valor mais elevado relativo ao setor sul da Ilha e o menor à zona do Paúl da Serra. A evapotranspiração real anual média está compreendida entre cerca de 513 mm e 673 mm, verificando-se os valores mais elevados na zona norte da ilha da Madeira, nas estações de Santana e Ponta Delgada.

O clima na Região Autónoma da Madeira tem uma classificação segundo Köppen dos tipos B (clima seco) e C (clima temperado). Na ilha da Madeira predomina o tipo “*Csb* - Clima temperado com verão seco e temperado”. Este clima é caracterizado por ser seco no verão, em que a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e existem quatro meses ou mais com a temperatura média superior a 10°C. Encontram-se, em menor presença, climas do tipo “*Csa* - clima temperado com verão seco e quente” nas zonas costeiras da ilha da Madeira; e do tipo “*Csc* - temperado com verão seco e fresco”, nas áreas de grande altitude do Pico Ruivo e do Pico do Areeiro, na ilha da Madeira.

Relativamente à velocidade média do vento de acordo com a figura 6, esta apresenta uma distribuição mais significativa para os rumos de este e oeste, ainda que os ventos de nordeste e sudoeste sejam os mais frequentes no concelho do Funchal (PGRH10, 2013).

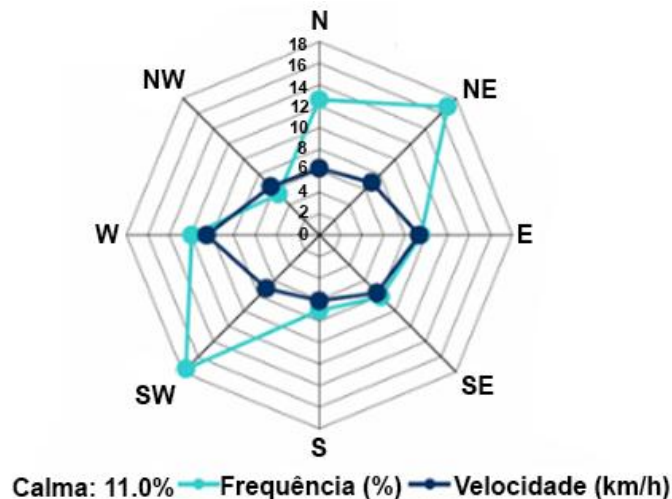


Figura 6 - Valores médios anuais do vento no Funchal

(Fonte: Adaptado do Instituto de Meteorologia)

Relativamente à classificação através do método de Thornthwaite-Mather, na ilha da Madeira identificam-se as seguintes distribuições, de acordo com o índice hídrico: “super-húmido (A)” nas zonas de maior altitude e pluviosos da Ilha, “muito húmido (B4)” no concelho de Santana; “moderadamente húmido (B2)” na freguesia de Ponta Delgada, “sub-húmido (C2)” na freguesia do Monte e “semiárido (D)” em diversos setores da costa sul, sobretudo no concelho do Funchal e na zona do Lugar de Baixo.

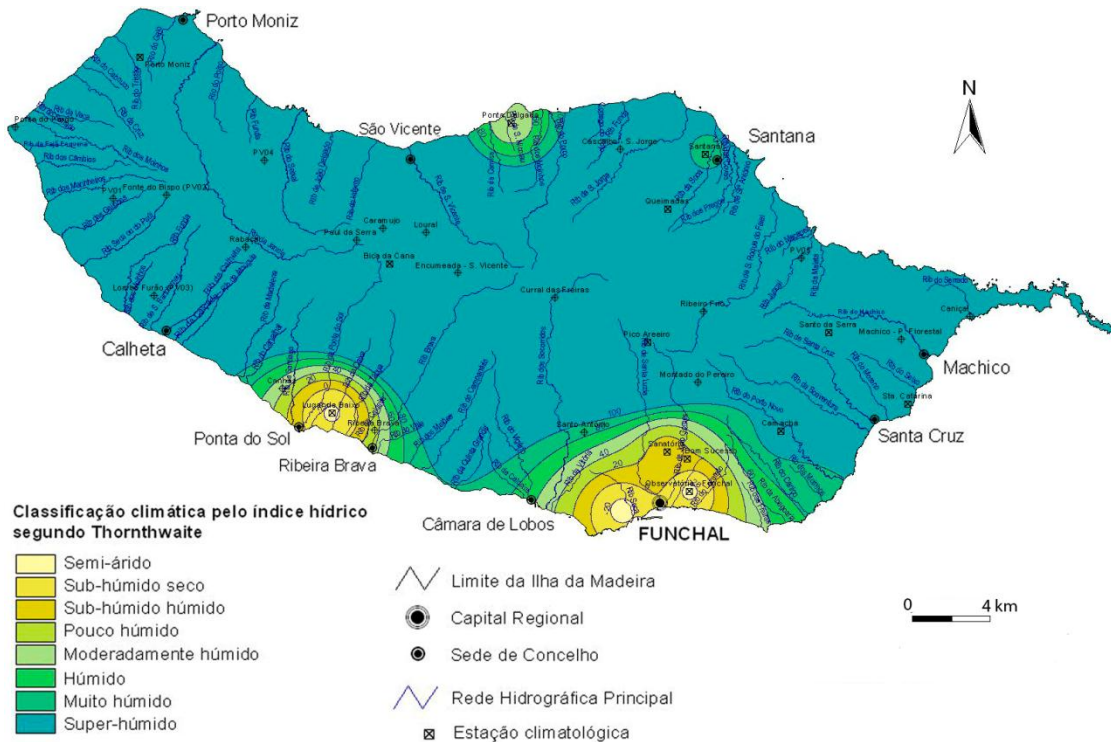


Figura 7 - Classificação climática pelo índice hídrico segundo Thornthwaite

(Fonte: PRAM, 2003)

2.3 Rede Hidrográfica

A rede hidrográfica da ilha da Madeira “encontra-se fortemente encaixada, apresentando trechos retilíneos em extensões significativas. A orientação geral dos cursos de água principais é radial e mantem-se o alinhamento retilíneo praticamente desde a nascente até à foz, no mar. Constituem alteração a estas direções predominantes a ribeira da Janela um trecho de montante da ribeira dos Socorridos” (PRAM, 2003).

Esta rede hidrográfica é composta por mais de 200 cursos de água que se apresentam, na sua grande maioria de forma radial. Os cursos de água que compõem esta rede são de carácter torrencial, refletindo o relevo das ilhas e o regime de precipitação. Quase todas as

principais ribeiras apresentam desníveis superiores a 1200 metros e raramente ultrapassam os 20 quilómetros de extensão. Em relação à sua composição material, os leitos são compostos de uma forma geral, por sedimentos rochosos, onde muito raramente se pode observar deposição de sedimentos finos.

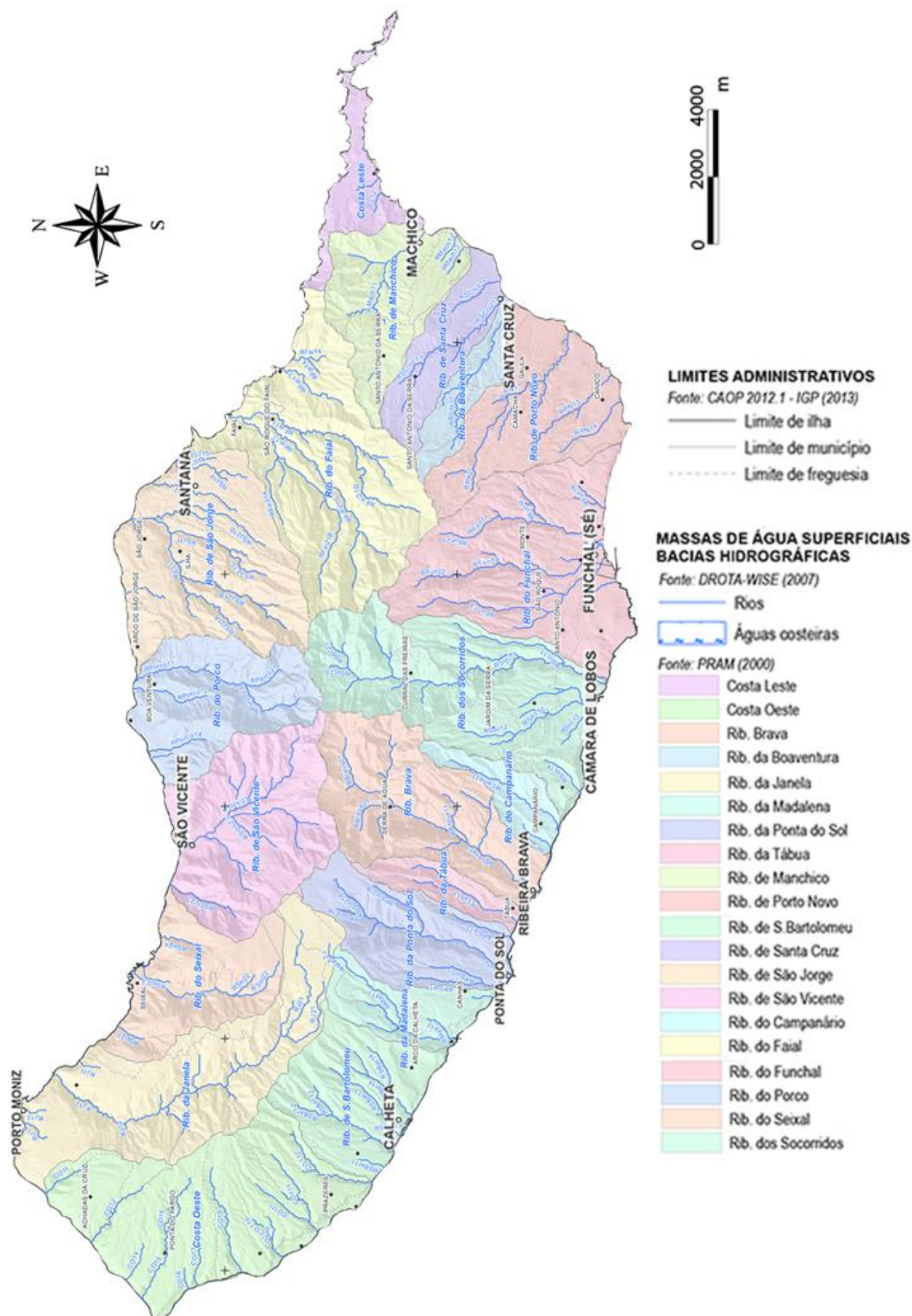


Figura 8 - Rede Hidrográfica Principal da ilha da Madeira

(Fonte: Adaptado do PGRH10, 2013)

A vertente norte da Ilha é composta por numerosas e pequenas ribeiras, que mesmo no verão apresentam um caudal significativo, contrariamente às ribeiras da encosta sul da Ilha, cujo caudal no período de verão é quase inexistente.

As bacias hidrográficas da ilha da Madeira são de uma forma geral, pouco largas e alongadas e com áreas pequenas. A que apresenta maior área é a da ribeira dos Moinhos com cerca de 66,92 km² seguida da ribeira do Faial com 66,24 km² e pela ribeira dos Socorridos com 63,31 km². A altitude média das bacias das principais linhas de água varia entre os 875 metros, para a mais alta, a ribeira do Seixal e os 181 metros para a de menor altitude média, a ribeira do Serrado. Estas também apresentam um declive acentuado, a de maior declive, 21,32% a ribeira da Madalena e a que apresenta menor declive é a ribeira da Janela com valores na ordem dos 7,11%. A tabela 1 resume todas as características gerais das principais bacias hidrográficas da ilha da Madeira.

Tabela 1 - Bacias / Cursos de Água Principais da ilha da Madeira

(Fonte: PGRH10, 2013; Georisco, 2011)

Bacia / Curso de Água	Área da Bacia (km ²)	Perímetro da Bacia (km)	Altitude Média da Bacia (m)	Comprimento do Curso de Água Principal (m)	Altitude Máxima do Curso de Água Principal (m)	Declive Médio do Curso de Água Principal (%)
Rib. da Boaventura	10,79	20,813	739	10626	1350	12,68
Rib. Brava	44,58	33,963	755	13643	1540	11,29
Rib. do Campanário	10,45	18,297	618	8401	1420	16,90
Rib. do Faial	66,24	47,328	712	14526	1493	10,27
Rib. da Janela	62,52	50,314	843	21987	1564	7,11
Rib. de Machico	30,35	27,874	395	12384	1035	8,36
Rib. da Madalena	16,30	21,387	742	6545	1396	21,32
Rib. dos Moinhos	66,92	40,020	634	9558	1231	12,87
Rib. da Ponta do Sol	30,02	27,245	837	11842	1566	13,22
Rib. do Porco	34,69	27,136	695	10245	1485	14,49
Rib. do Porto Novo	38,31	32,927	552	12913	1379	10,68
Rib. de Santa Cruz	18,38	23,277	556	10329	1273	12,33
Rib. de Santa Luzia	61,55	43,311	581	11548	1695	14,68
Rib. de São Bartolomeu	31,59	25,679	607	6775	1201	17,72
Rib. de São Jorge	54,66	34,568	646	10409	1399	13,44
Rib. de São Vicente	48,16	32,456	747	10291	1640	15,94
Rib. do Seixal	30,36	31,242	875	10472	1569	14,93
Rib. do Serrado	13,45	46,285	181	3872	592	15,29
Rib. dos Socorridos ¹	38,62	36,84	599	17210	1660	9,74
Rib. da Tabua	9,37	18,215	684	7604	1505	19,76
Rib. do Vigário ¹	15,42	19,56	401	9270	1323	12,48

¹ Estes dados serão analisados posteriormente.

2.4 Geologia

A ilha da Madeira está situada na placa Africana, mais concretamente na região intraplaca, que se edificou durante o período do Miocénico (entre 5 e 24 milhões de anos), sendo referida alguma atividade significativa durante o início do Quaternário (há cerca de 1,4 milhões de anos), e é fruto de magmatismo oceânico intraplaca, cuja origem do vulcanismo é consensualmente atribuída a um ponto quente (“hot-spot”).

É composta geologicamente, por rochas eruptivas, nomeadamente: basaltos hawaiiitos, mugearitos, traquitos e rochas piroclásticas (tufos e cinzas). (Abreu *et. al.*, 2009)

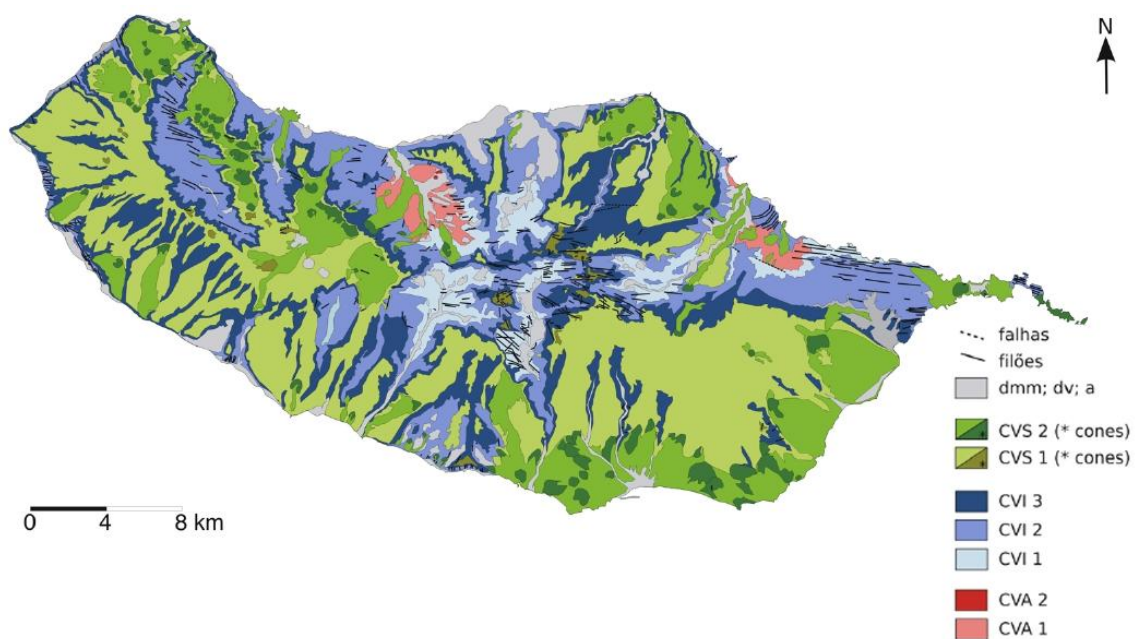


Figura 9 - Carta Geológica da ilha da Madeira

(Fonte: Madeira *et al.*, 2007)

A ilha da Madeira é composta por três fases de erupção vulcânica, cuja estratigrafia foi identificada, da base para o topo:

- Complexo Vulcânico Antigo (CVA) (mais de 5,57 Milhões de anos);
- Complexo Vulcânico Intermédio (CVI) (5,57 - 1,8 Milhões de anos);
- Complexo Vulcânico Superior (CVS) (1,8 - 0,0007 Milhões de anos).

Cada um destes complexos é composto por várias unidades estratigráficas delimitadas por inconformidades regionais. (Brum da Silveira, *et. al.*, 2008)

As setes unidades vulcano-estratigráficas principais, da mais antiga para a mais recente, analisando a seguinte figura da esquerda para a direita são:

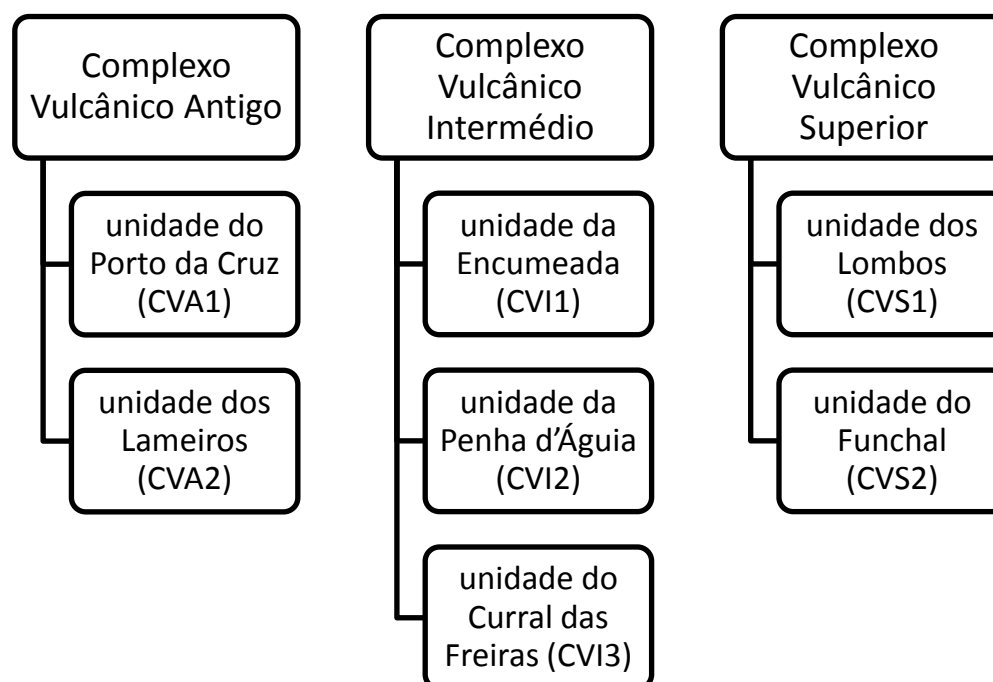


Figura 10 - Unidades vulcano-estratigráficas principais

Além destas, identificaram-se depósitos sedimentares recentes, tais como:

- depósitos de movimentos de massa (dmm);
- depósitos de vertente (dv);
- aluviões (a).

2.5 Geomorfologia

A ilha da Madeira caracteriza-se pelo seu relevo irregular e vales profundos. Tem cerca de 153 quilómetros de costa, e o seu litoral é formado principalmente por arribas altas e declivosas ou escarpas, principalmente na costa norte, visto sofrer de uma maior ação erosiva em relação à costa sul. A sudoeste da ilha da Madeira, localiza-se a arriba mais alta da Europa, o cabo Girão, com cerca de 580 metros de altitude.



Figura 11 - Cabo Girão

(Fonte: http://www.trekearth.com/gallery/Europe/Portugal/Islands/Madeira/Camara_de_Lobos/photo948383.htm)

A variação de cotas altimétricas também é destacada: cerca de 4% da ilha eleva-se subitamente até aos 1600 metros, e acima dos 1000 metros de altitude está cerca de 25% da sua superfície.

Segundo Zbyszewski *et al.* (1975), geomorfologicamente a Ilha divide-se em três complexos diferentes:

- Paul da Serra (UGRC1);
- Maciço Vulcânico Central (UGRC2);
- Ponta de São Lourenço (UGRC3).

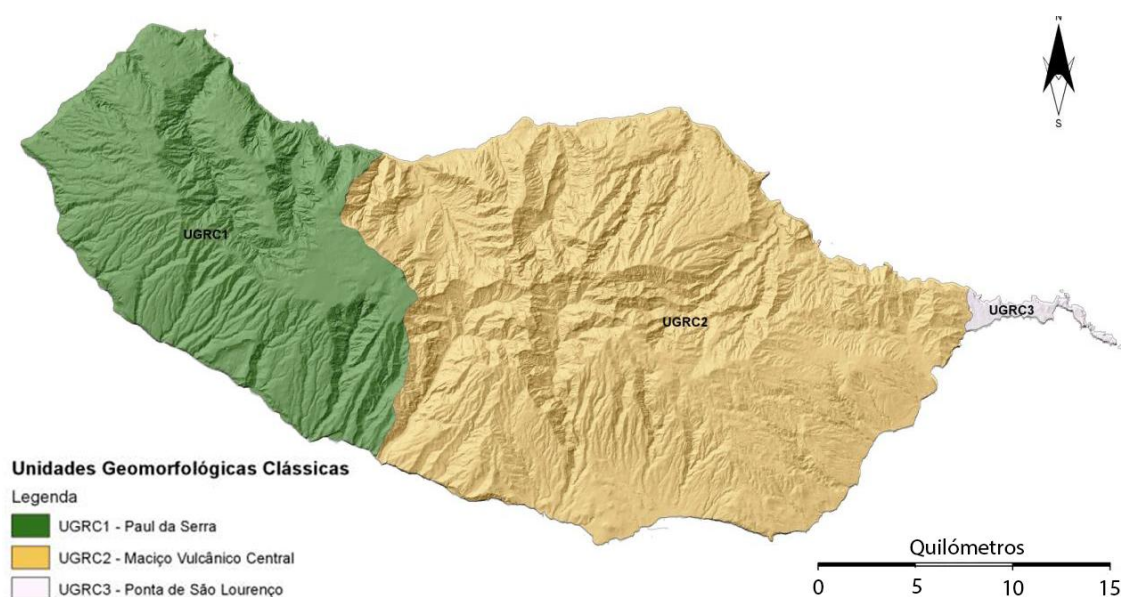


Figura 12 - Unidades Geomorfológicas Clássicas

(Fonte: Zbyszewski et al. (1975) (Abreu,2007))

O Paul da Serra (UGRC1) define-se como a principal estrutura morfológica da parte ocidental da Ilha. É separado do Maciço Central pelos profundos vales da Ribeira Brava, a sul, e São Vicente, a norte. Tem cerca de 16 quilómetros de comprimento e 6 quilómetros de largura máxima e desenvolve-se, na sua parte mais ampla, entre as cotas de 1400 metros e 1500 metros.

O Maciço Vulcânico Central (UGRC2) situa-se na região central e nele situam-se os picos de maior altitude, destacando: o Pico Ruivo, com 1862 metros, que é o mais alto da Ilha, e o Pico do Areeiro, com 1818 metros. Além destes picos, situam-se também enormes e profundas depressões, tal como, a do Curral das Freiras, com uma parede vertical com cerca de 600 metros de altura, sendo esta a mais importante de toda a Ilha.

Na extremidade oriental da Ilha encontra-se a Ponta de São Lourenço (UGRC3), que corresponde a uma estreita e irregular península encurvada que a erosão marinha está a destruir lentamente. Este complexo distingue-se dos restantes pelo seu relevo suave e baixa altitude média, correspondente a uma fraca pluviosidade e conseqüente escassez de vegetação, contrastando com o resto da Ilha (Prada S. , 2000).

2.6 Hidrologia e Hidrogeologia

A atividade hidrológica é dividida em dois ramos, o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo. Da soma destes dois resulta o escoamento superficial potencial total.

Na ilha da Madeira, os valores de precipitação média permitem a existência de recursos hídricos com valores superiores aos das necessidades médias de água. Mas apesar desta situação, a incapacidade de regularizar o escoamento superficial faz com que esta tenha que ser compensada com recurso às águas subterrâneas.

Existem diferenças substanciais entre a vertente norte e vertente sul da Ilha. Na vertente norte há uma maior disponibilidade e menores necessidades, o oposto acontece na vertente sul, principalmente a nascente, onde há uma menor disponibilidade e maiores necessidades. (PGRH10, 2013)

O escoamento superficial surge através da ocorrência da precipitação nas bacias hidrográficas, proliferando o escoamento pela superfície do terreno. Na ilha da Madeira o escoamento superficial aumenta significativamente com a altitude, ocorrendo os menores valores junto à costa.

Quanto ao escoamento subterrâneo, dá-se essencialmente em zonas de maior altitude e de menor declive, onde a precipitação atinge valores elevados e as formações vulcânicas são mais recentes, logo mais permeáveis, permitindo assim a sua infiltração.

De acordo com a *Notícia Explicativa VII.3*, do Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, o comportamento hidrogeológico das formações vulcânicas da ilha da Madeira é influenciado:

- pela idade da litologia prevalecente;
- pelas estruturas geotectónicas existentes (fraturais e rede filoniana);
- pelos valores de porosidade e permeabilidade, num contexto geológico.

Foram assim estabelecidas quatro unidades hidrológicas na ilha da Madeira:

- áreas favoráveis à infiltração;
- aquíferos locais e descontínuos de elevada produtividade;
- aquíferos de moderada e elevada produtividade, com reservas somente locais;

- aquíferos pouco produtivos ou eventualmente de boa produtividade, em zonas muito localizadas.



Figura 13 - Enquadramento Hidrogeológico da ilha da Madeira

(Fonte: APA, 2007)

Segundo *Prada et. al. (2005)*, o modelo hidrogeológico da ilha da Madeira difere os seus aquíferos em três tipologias diferentes: Aquíferos suspensos, Aquífero de base e Aquíferos compartimentados.

Os aquíferos suspensos situam-se a uma maior altitude e formam-se quando a água infiltrada encontra uma camada pouco permeável ou impermeável e fica retida. Estes subdividem-se ainda em superficiais e profundos. Os primeiros situam-se a uma cota mais elevada e são mais vulneráveis às variações do clima, variando os seus caudais, ao longo do ano hidrológico, consoante a recarga, chegando alguns deles a esgotar. Os aquíferos suspensos profundos, situam-se também em altitude, mas a uma cota mais baixa, sendo que os seus caudais são menos sensíveis às variações do clima.

Os aquíferos de base, localizam-se a partir de uma certa profundidade, devido às heterogeneidades e descontinuidades que caracterizam os meios vulcânicos. Nestas partições contíguas do aquífero verifica-se níveis piezométricos diferentes.

Os aquíferos compartimentados devem-se ao facto de o vulcanismo na Madeira ser de uma forma geral do tipo fissural, e todo o edifício vulcânico encontra-se atravessado por filões subverticais que limitam o aquífero de base, dando assim a origem a variações de

potencial entre compartimentos próximos. Esta compartimentação é responsável pela existência de compartimentos ou células secas, localizados em zonas que não recebem recarga.

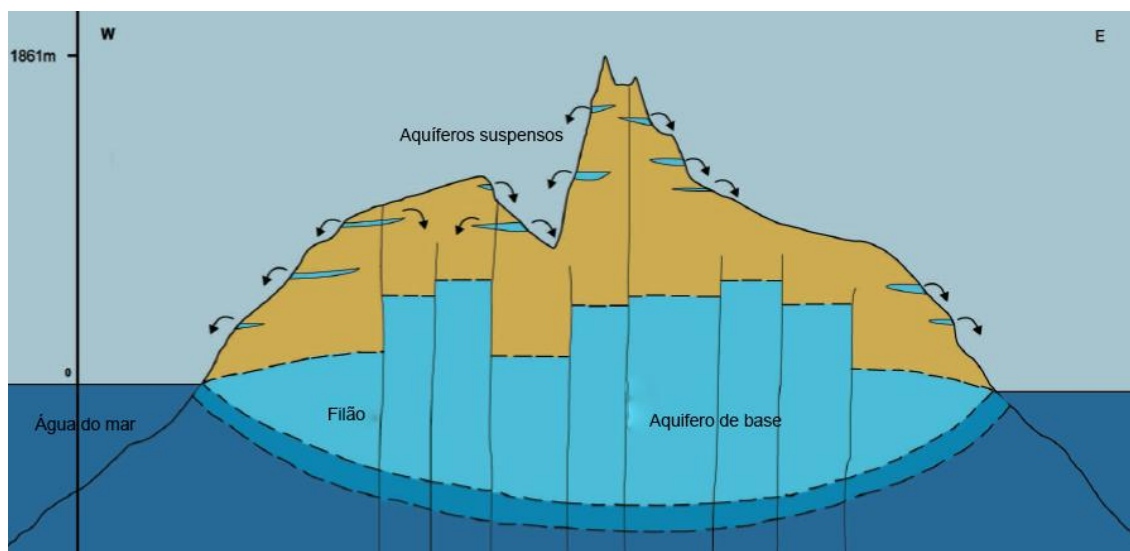


Figura 14 - Modelo Hidrogeológico da ilha da Madeira

(Fonte: Prada *et al.*, 2005)

2.7 Relevo

A ilha da Madeira caracteriza-se pelo seu relevo acentuado e formas vigorosas, com vales muito encaixados e profundos.

A altitude média da ilha da Madeira é de 646 metros, situando-se apenas 8%, abaixo dos 100 metros de altitude. Apresenta 35% de área com altitudes superiores a 1000 metros e cerca de 90% acima da cota dos 500 metros.

O declive médio da Ilha é de 56%, sendo que 65% da Ilha possui declives superiores a 25%, 23% tem declives entre os 16% e os 25% e apenas 12% inferiores a 16% de declive, o que corresponde a uma área de 85 km², sendo assim escassas as áreas planas.

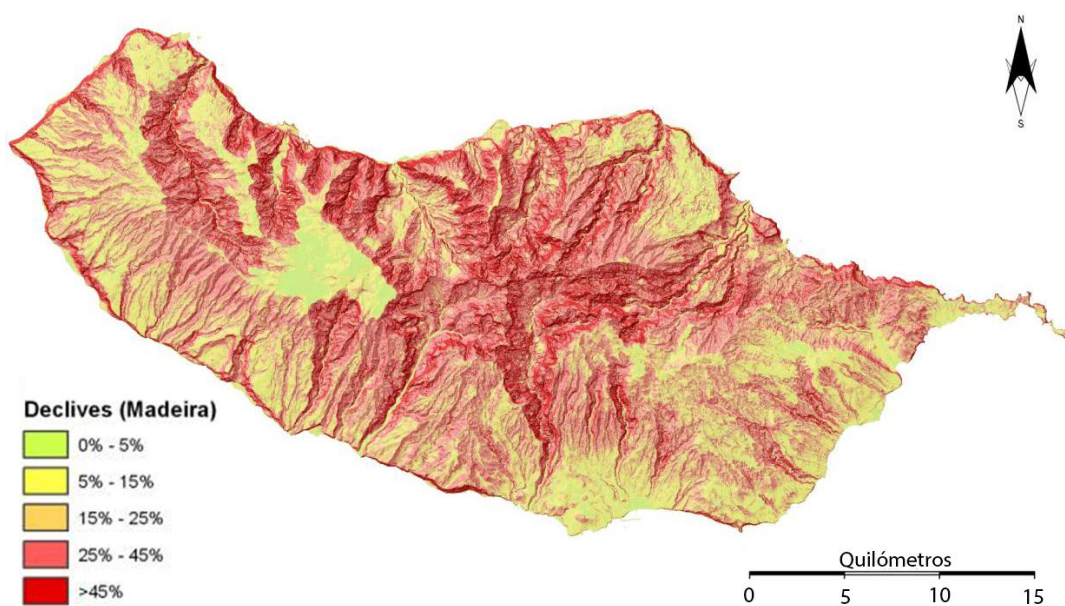


Figura 15 - Carta de Declives da ilha da Madeira

(Fonte: Georisco, 2011)

2.8 Solos

Os solos da ilha da Madeira caracterizam-se essencialmente por serem de origem basáltica. Os solos mais representativos segundo a classificação da *World Reference Base for Soil Resources (WRB)* são os Andosols (AN), em cerca de 41,4%, distribuídos por toda a Ilha, com exceção na região central, que é ocupada predominantemente por escarpas. Na carta de solos da ilha da Madeira, publicada em 1992 é possível localizar 8 grupos principais de solos, subdivididos em 15 unidades-solo, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 - Grupos principais e unidades-solo

Grupos Principais	Unidades-solo
Fluviosols (FL)	Eutric Fluviosols (FLe)
	Dystric Fluviosols (FLd)
Leptosols (LP)	-
Arenosols (AR)	Calcaric Arenosols (ARc)
Andosols (AN)	Umbric Andosols (ANu)
	Vitric Andosols (ANz)
Vertisols (VR)	Eutric Vertisols (VRe)
Cambisols (CM)	Eutric Cambisols (CMe)
	Dystric Cambisols (CMd)
	Humic Cambisols (CMu)
	Chromic Cambisols (CMx)
	Vertic Cambisols (CMv)
Calcisols (CL)	Haplic Calcisols (CLh)
Phaeozems (PH)	Haplic Phaeozems (PHh)

Existem também outros tipos de terreno na ilha da Madeira, como é o caso dos referidos na tabela seguinte:

Tabela 3 - Outros tipos de terreno na ilha da Madeira

Grupos Principais	Unidades-solo
Terreno Rochoso	Terreno Rochoso Êutrico (TRe)
	Terreno Rochoso Districo (TRd)
Terreno Acidentado	Terreno Acidentado Êutrico (TAe)
	Terreno Acidentado Districo (TAd)
Depósito de Praia	
Acumulações Salinas	

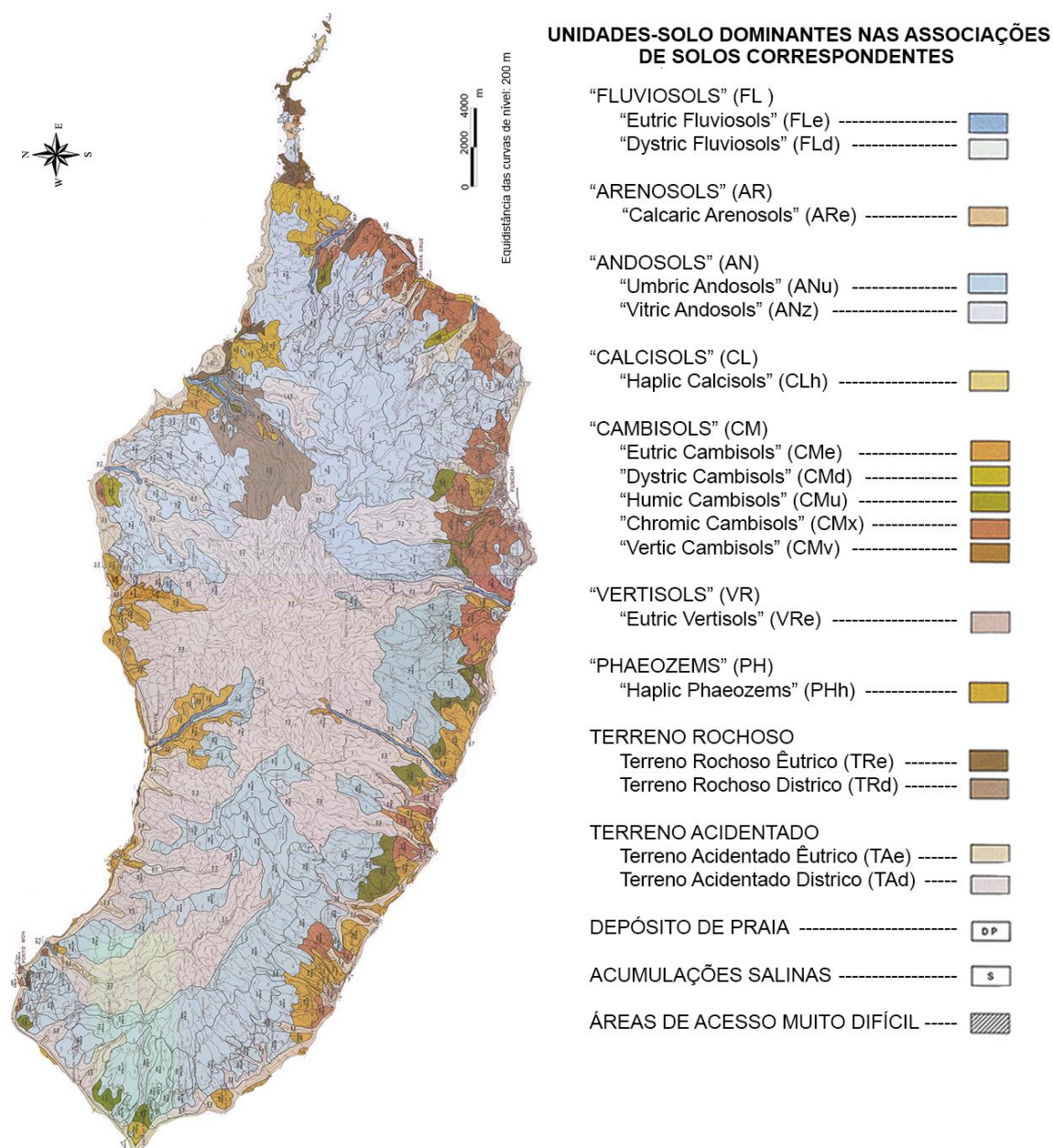


Figura 16 - Carta de Solos da Madeira

(Fonte: Carta de Solos da ilha da Madeira, 1992)

2.9 Vegetação e Uso do Solo

A conservação da natureza tem sido alvo de grande destaque na ilha da Madeira. Existem grandes áreas de zonas protegidas tais como o “Parque Natural da Madeira”, que ocupa 2/3 da Ilha, a “Reserva da Rocha do Navio” e a “Reserva do Garajau”. Um facto a ter em conta, é a classificação como Património Mundial Natural pela UNESCO, em 1999, da “Laurissilva” da ilha da Madeira.

A vegetação da Madeira inclui vários tipos de florestas, onde se inclui a Laurissilva, que é uma floresta húmida subtropical, composta maioritariamente por árvores da família das lauráceas e endémico da Macaronésia, região formada pelos arquipélagos da Madeira, Açores, Canárias e Cabo Verde. Nas zonas de menor altitude existem também bosques menos dependentes de água. Na ilha da Madeira, diferenciam-se andares de vegetação estratificados por altitudes, relacionados com a variação de situações climáticas.

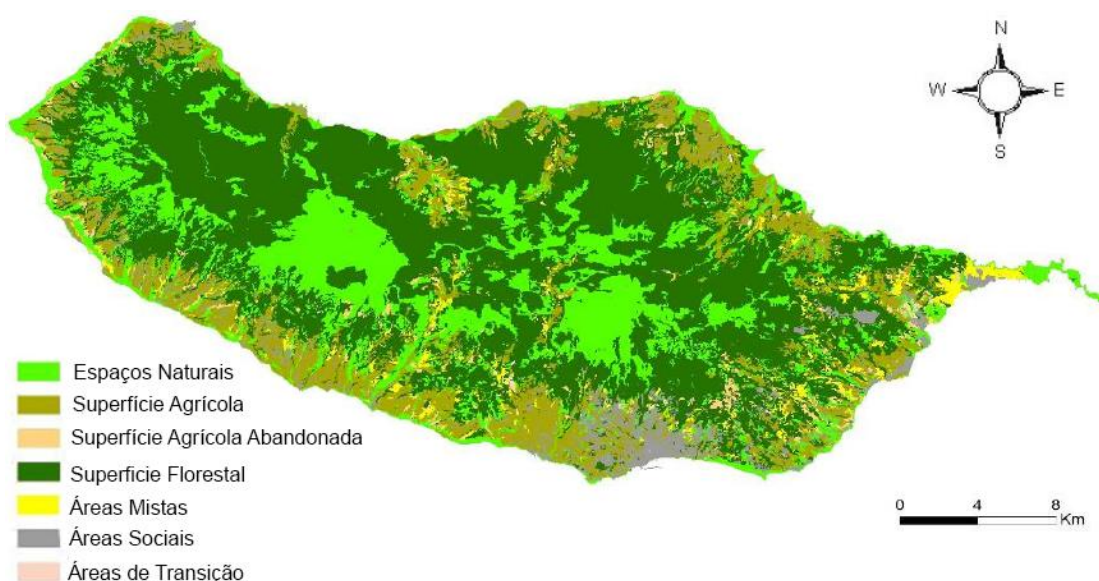


Figura 17 - Ocupação do Solo na ilha da Madeira

(Fonte: PRAM, 2003)

Relativamente ao uso do solo na ilha da Madeira, este, é ocupado essencialmente por espaços naturais, superfícies agrícolas e florestais, e áreas sociais. Como podemos verificar na figura 17 mais de metade da Ilha é ocupada pela superfície florestal, seguindo-se os espaços naturais e por fim a superfície agrícola. Podemos verificar em menor quantidade as áreas sociais que são as ocupadas pelas edificações e respetivas estruturas associadas.

2.10 Situações de Risco

2.10.1 Alterações Climáticas

A análise de possíveis efeitos das mudanças climáticas na ilha da Madeira foi realizada no âmbito dos Projetos Científicos SIAM I (Santos *et al.*, 2002) e SIAM II (Santos & Miranda, 2006) - *Climate Change in Portugal, Scenarios, Impacts and Adaptations Measures* - e CLIMAAT II (Santos & Aguiar, 2006) - *Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos II*.

Esta análise foi feita com base no período compreendido entre 1961-1990, em que foram obtidos resultados para o período relativo a 2040-2069 que indicam uma redução entre 5% e 30% da precipitação anual, especialmente na estação do inverno verificando-se que as principais zonas a serem afetadas serão as de maior altitude. Está análise também permitiu prever um aumento entre 1,4 °C e 3,2 °C da temperatura média anual, que se fará sentir especialmente na vertente sul e pelos aumentos das temperaturas máximas tanto no verão (entre 0,6-2,1 °C), como no inverno (entre 0,7-2,1 °C).

Estas mudanças vão fazer sentir os seguintes efeitos sobre os recursos hídricos:

- diminuição do escoamento durante todo o ano (de uma forma mais acentuada no outono e inverno, alternando entre 10% e 50 %);
- mudanças nos regimes de cheias e secas, com as inundações dos troços finais das ribeiras a poderem ser agravadas pela subida do nível médio do mar;
- alterações na qualidade das águas superficiais;
- diminuição da recarga de aquíferos, especialmente no outono e inverno com variações entre 25% a 50% e aumento no verão entre 25% a 50%;
- poderá ocorrer uma redução da precipitação no que toca à sua contribuição para a recarga de aquíferos;
- modificação do regime de agitação marítima e elevação do nível médio do mar, que poderá atingir até 50 cm no final do século XXI;
- procura de água irá sofrer um aumento, especialmente para o uso na irrigação.

2.10.2 Cheias

Devido às suas características particulares, nomeadamente, pequenas bacias hidrográficas com declives muito acentuados que originam tempos de concentração muito curtos, na ilha da Madeira existe tendência para a ocorrência de cheias repentinas, a que se associam elevados caudais de ponta de cheia, originários das elevadas intensidades de precipitação. É nas populações à beira-mar e junto das margens dos cursos de água que se localizam as situações de maior perigo de cheia, fruto da expansão urbanística e das características topográficas locais.

Na tabela seguinte estão representados as principais ocorrências históricas de aluviões na Madeira, nome pelo qual estas cheias e inundações são conhecidas nesta região, apesar de no contexto científico ter o significado de depósito sedimentar. Estes tipos de fenómenos também são conhecidos por cheias rápidas ou enxurradas.

Tabela 4 - Principais eventos históricos de aluviões na ilha da Madeira

(Fonte: Estudo de Avaliação de Riscos na ilha da Madeira, 2010)

Data	Zona	Vítimas e danos
9 de outubro de 1803	Funchal	800 - 1000 vítimas
26 de fevereiro de 1920	Funchal, Ribeira Brava, Camacha	5 vítimas
6 de março de 1929	S. Vicente	32 vítimas, 11 casas e 100 palheiros destruídos
30 de dezembro de 1939	Madalena do Mar	4 vítimas
11 de fevereiro de 1956	Curral das Freiras	2 vítimas
3 de novembro de 1956	Machico, Santa Cruz	6 vítimas
3 a 6 de janeiro de 1963	Ribeira Brava, Serra de Água	5 vítimas
9 de janeiro de 1970	Ribeira Brava, Serra de Água	4 vítimas
21 de setembro de 1972	Santo António	2 vítimas
20 de dezembro de 1977	Estreito de Câmara de Lobos	4 vítimas e 45 desalojados
23 e 24 de janeiro de 1979	Machico, Porto da Cruz, Camacha, Canhas, Calheta	14 vítimas
29 de outubro de 1993	Por toda a ilha da Madeira	4 vítimas, 4 desaparecidos, 306 desalojados, 76 habitações afetadas e 27 feridos
5 e 6 de março de 2001	Curral das Freiras e S. Vicente	5 vítimas e 120 pessoas desalojadas
22 de dezembro de 2009	Madalena do Mar e S. Vicente	Destruição de vias de comunicação e habitações
20 de fevereiro de 2010	Funchal e Ribeira Brava	45 vítimas, 6 desaparecidos, 600 desalojados e 250 feridos

2.10.3 Secas

Segundo o PGRH10, que define uma seca como a não ocorrência de precipitação durante um determinado período, no qual normalmente deveria ter existido alguma precipitação, dependendo do local e da estação do ano, os períodos em que ocorreram secas mais graves correspondem aos anos de 1943/44 a 1944/45, 1947/48, 1950/51, 1954/55, 1956/57, 1960/61 e de 1980/81 a 1982/83, sendo esta metodologia apenas baseada em medições de precipitação. Das datas referidas anteriormente, a seca mais rigorosa foi a de 1960/61, tendo atingido o período de retorno próximo de 100 anos. Em termos de localização é na zona este da Madeira que ocorrem secas com maior frequência.

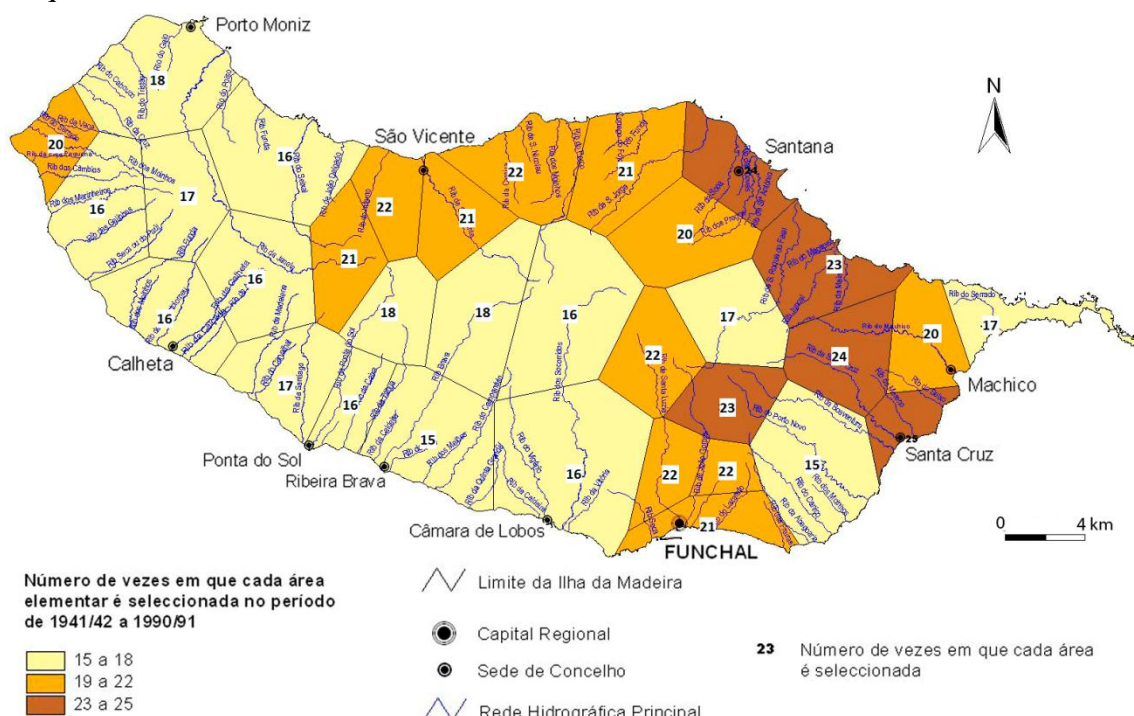


Figura 18 - Frequência de secas na ilha da Madeira entre 1941/42 e 1990/91

(Fonte: PRAM, 2003)

Nos últimos anos, o período de seca que merece referência foi o de 2011-2012. Neste período a precipitação média calculada para a ilha da Madeira foi de 538 mm, quando a média de precipitação em anos secos é de aproximadamente 1000 mm. Neste mesmo período, a precipitação foi apenas 100 mm superior ao valor da evapotranspiração prevista para anos secos, o que se traduziu numa redução acentuada no escoamento superficial e na recarga dos aquíferos.

2.10.4 Erosão Hídrica

Este tema é abordado no âmbito do PRAM (2003), tendo-se baseado na equação universal de perda de solo que calcula a erosão específica do solo por unidade de superfície (t/ha.ano) sob o regime de erosão laminar. Segundo este mesmo plano, dos resultados obtidos, convém salientar que 14 em 52 as bacias hidrográficas onde a perda de solo potencial é mais elevada, 9 situam-se no flanco sul da Ilha, sendo 11 as bacias hidrográficas onde o risco potencial médio, elevado e muito elevado é superior a 90%.

Convém, referir ainda que, 12 entre 52 as bacias hidrográficas onde a perda de solo atual é mais intensa, 8 destas se situam no flanco sul da Ilha. Em 15 bacias hidrográficas, a percentagem de área com risco de erosão atual médio, elevado e muito elevado é superior a 80% e 11 situam-se no flanco sul da Ilha.

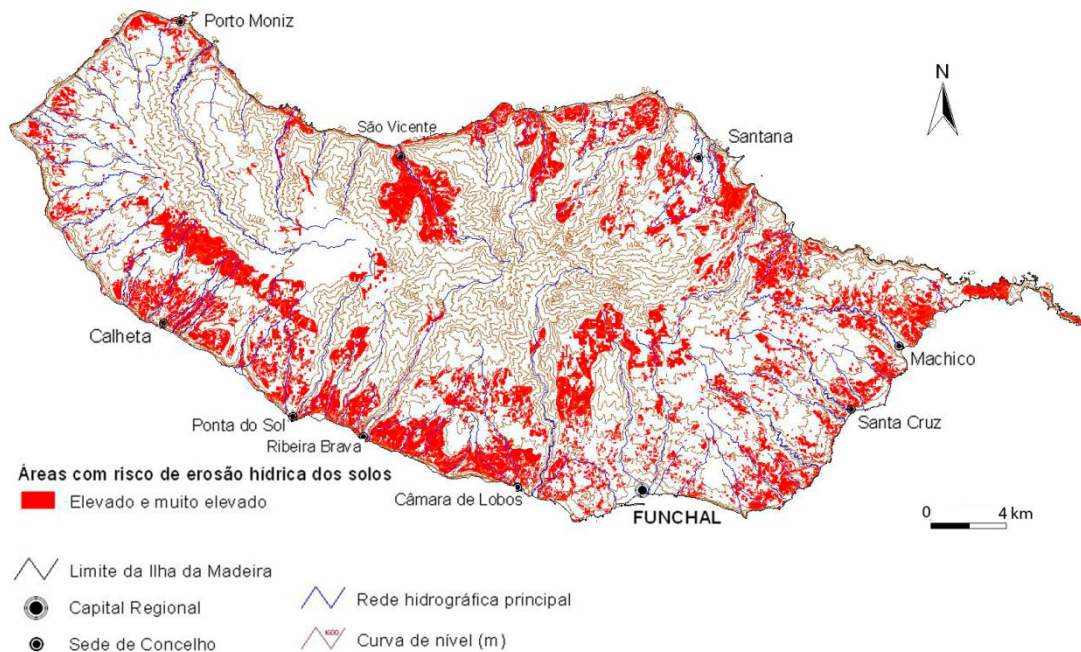


Figura 19 - Zonas de maior risco de erosão hídrica na ilha da Madeira

(Fonte: PRAM, 2003)

Como podemos verificar na figura 19, as bacias hidrográficas onde a erosão hídrica se faz sentir de uma forma mais intensa são: ribeira de S. Vicente (flanco norte); ribeira de S. Roque do Faial (flanco norte); ribeira de S. Jorge (flanco norte); ribeira de Machico (flanco norte); ribeira do Porco (flanco norte); ribeira de S. Bartolomeu (flanco sul); ribeira do Vigário (flanco sul); ribeira da Ponta do Sol (flanco sul); ribeira dos Socorridos

(flanco sul); ribeira de S. João (flanco sul); ribeira do Campanário (flanco sul); ribeira Brava (flanco sul) e ribeira do Porto Novo (flanco sul).

2.10.5 Erosão Costeira

Na ilha da Madeira este tipo de evento revela alguma importância e um certo risco, visto ocorrer devido ao recuo da linha de costa relacionado com os movimentos de massa de vertente que determinam a evolução natural das arribas, que podem originar alterações na geometria e perfis das praias. Devido à influência da energia da ondulação do oceano Atlântico, a Ilha está exposta a um grande gradiente energético, o que relacionado com a geologia, com a sua fisiografia e com o clima, explica a maioria dos movimentos de massa de vertente que se verificam.

A intervenção do homem também teve influência na alteração da linha de costa e na aceleração dos fenómenos erosivos. A ocupação das arribas, afetação da estabilidade dos maciços dunares e a construção de obras marítimas foram os fatores que mais contribuíram para este efeito. O PRAM, 2003 também refere que um dos fatores que contribuíram para a erosão costeira nos últimos anos, foi a regularização a montante das bacias hidrográficas que terá diminuído o transporte sólido afluente à linha de costa. Segundo este, a ilha da Madeira está classificada com uma severidade média no que respeita à erosão costeira.

2.10.6 Transporte Sólido e Movimentos de Massa de Vertentes

Na ilha da Madeira o transporte sólido tem uma importância relevante e ocorre com alguma frequência, sendo que resulta de fatores internos associados aos terrenos vulcânicos e de fatores externos como a intervenção humana ou a fatores climáticos, como chuvas intensas associadas aos grandes declives das linhas de água e ao seu carácter torrencial.

Neste tipo de fenómenos é possível verificar nos leitos das principais ribeiras sedimentos, com granulometrias de seixo e calhau, sendo alguns deles com dimensões bastante significativas. Este tipo de material depositado junto à foz, onde estão os

principais aglomerados populacionais, contribui para o aumento do caudal sólido e assoreamento de linhas de água, aumentando o risco de cheias após chuvas intensas.

Os movimentos de massa de vertentes devem-se a vários fatores como a orografia acentuada que está associada à erosão e a uma grande pluviosidade em zonas onde a cobertura vegetal é escassa ou onde esta foi alterada por ações do homem.

Segundo Zêzere (2005), existem vários tipos de movimentos de massa de vertentes:

- Desabamento;
- Balançamento;
- Deslizamentos:
 - Rotacionais;
 - Translacionais;
- Expansão Lateral;
- Escoadas;
- Complexos.

Este tipo de movimentos podem causar danos humanos e materiais e quando ocorrem junto ao litoral, além do grande volume de material que ali se deposita, também podem originar tsunamis, como foi o caso de 1992 na Penha d'Águia, situada na freguesia do Porto da Cruz, com um desabamento de 1.800.000 m³ de rochas basálticas e piroclastos (figura 20).



Figura 20 - Desabamento na Penha d'Águia

(Fonte: Associação Insular de Geografia)

Capítulo 3:

Caracterização das principais linhas de água (ribeiras)

3.1 Localização geográfica

Através do *software computacional* de Sistema de Informação Geográfica (*ArcGis*) e das *shapefiles* disponibilizados pelo Atlas do Ambiente Digital - Instituto do Ambiente foi possível determinar a localização geográfica das bacias hidrográficas em estudo.

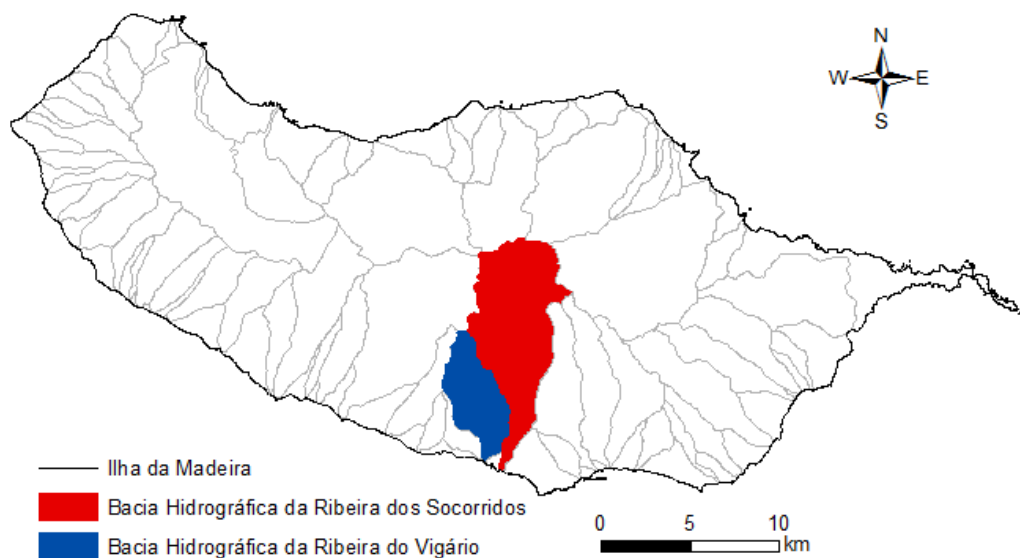


Figura 21 - Localização das bacias hidrográficas analisadas

(Fonte: Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)

A bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos localiza-se no sector este do município de Câmara de Lobos e estabelece fronteira com as bacias hidrográficas do concelho do Funchal a este, a norte com as bacias hidrográficas de Santana e a oeste com a bacia hidrográfica da ribeira do Vigário e da Ribeira Brava, sendo que a sul onde desagua situa-se o oceano Atlântico.

A bacia hidrográfica da ribeira do Vigário localiza-se na zona centro-sul do mesmo município sendo delimitada a este pela bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos, uma pequena faixa a norte pela bacia hidrográfica da Ribeira Brava, a oeste as bacias hidrográficas da ribeira da Caldeira e do Campanário fazem a fronteira e a sul onde se encontra a foz está o oceano Atlântico.

Esta informação apenas serve para uma pré-visualização da localização geográfica das bacias hidrográficas, sendo posteriormente feita a delimitação das mesmas e da rede de drenagem através de modelos digitais do terreno.

3.2 Características Fisiográficas

3.2.1 Caracterização climática

Os fatores que caracterizam o clima nesta bacia hidrográfica são os mesmos que o fazem para toda a ilha da Madeira e que já foram referidos anteriormente. Recorrendo novamente às *shapefiles* do Atlas do Ambiente Digital - Instituto do Ambiente e do software de Sistema de Informação Geográfica *ArcGis*, foi feita uma análise climática da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos, relativa à temperatura média anual e à precipitação anual média no período compreendido entre 1960 a 1991.

Através do mapa isotérmico, verifica-se que na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos em concordância com a ilha da Madeira, que a maior temperatura média faz-se sentir junto ao litoral a uma baixa altitude, cujos valores médios são superiores a 18°C. À medida que a altitude aumenta, a sua temperatura média anual diminui, o que faz com que esta atinja valores inferiores a 9°C nos seus pontos mais altos localizados a cerca de 1800 metros de altitude. Na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário que a temperatura média anual não baixa além dos 9°C, pelo facto de esta não ter altitudes máximas superiores a 1800 metros.

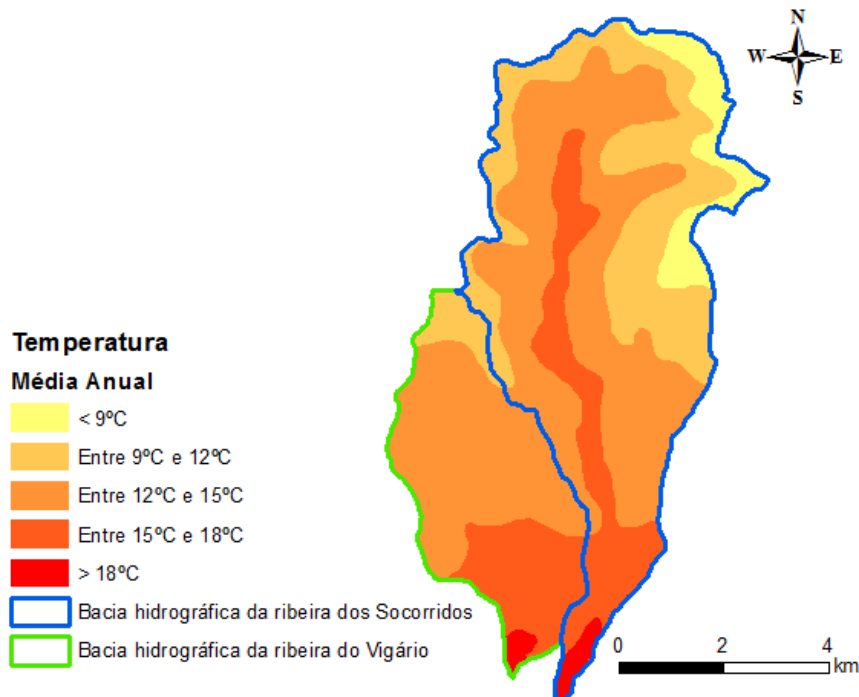


Figura 22 - Mapa isotérmico das bacias hidrográficas analisadas

(Fonte: Adaptado do Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)

Relativamente à precipitação na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos estes valores aumentam conforme o aumento da altitude. Quando se verificam altitudes, na ordem nos 1800 metros, os valores ultrapassam os 2800 mm, mas à medida que nos vamos aproximando da foz estes valores vão diminuindo até serem inferiores a 800 mm de média por ano.

Na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário, devido ao facto de esta se situar a cotas menos elevadas, este fator vai influenciar os valores de precipitação, onde na sua extremidade a norte não atinge valores médios anuais superiores a 2000 mm. Verifica-se assim uma redução significativa de valores de precipitação máximos em relação à bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos. Quanto aos restantes valores vão diminuindo quase de forma proporcional com a diminuição da altitude, verificando-se que junto ao oceano Atlântico estes são inferiores a 800 mm.

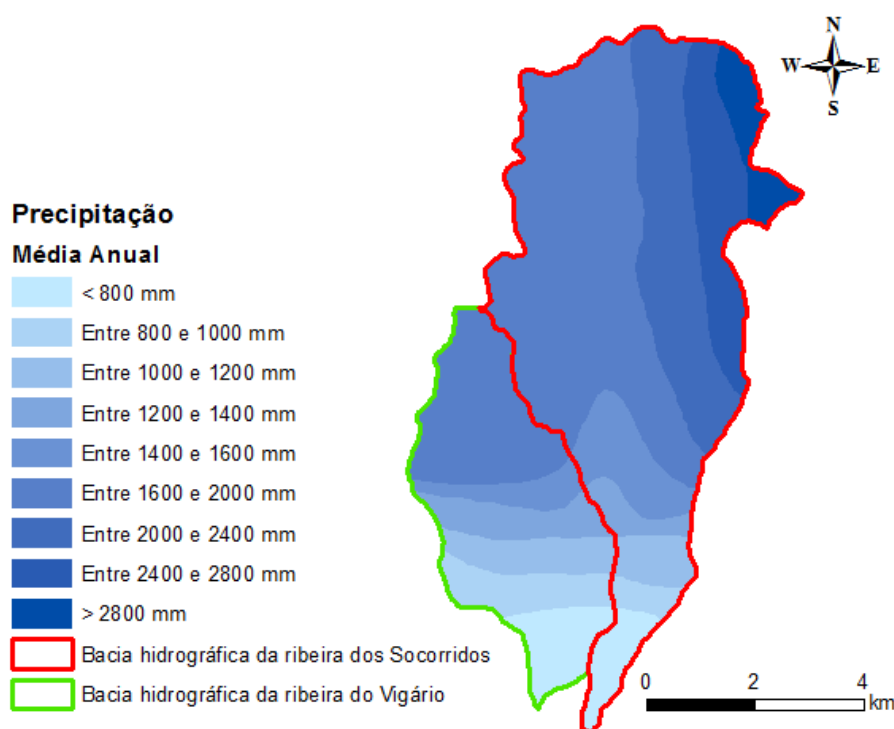


Figura 23 - Mapa de isoietas das bacias hidrográficas analisadas

(Fonte: Adaptado do Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente)

3.2.2 Caracterização geológica

Através da projeção das respetivas bacias hidrográficas em estudo na carta geológica da ilha da Madeira através do software *ArcGis* é possível ter uma melhor perceção das fases de erupção vulcânica.

Como podemos verificar na figura 24, em mais de metade da área da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos está presente o Complexo Vulcânico Intermédio que está datado entre os 5,57 e 1,8 milhões de anos, em que é possível verificar a unidade da Encumeada (CVI1), a unidade da Penha d'Águia (CVI2) e a unidade do Curral das Freiras (CVI3). Já na bacia hidrográfica da ribeira do Vigário o complexo predominante é, o Complexo Vulcânico Superior, com cerca de 1,8 a 0,0007 milhões de anos, e do qual fazem parte a unidade dos Lombos (CVS1) e a unidade do Funchal (CVS2).

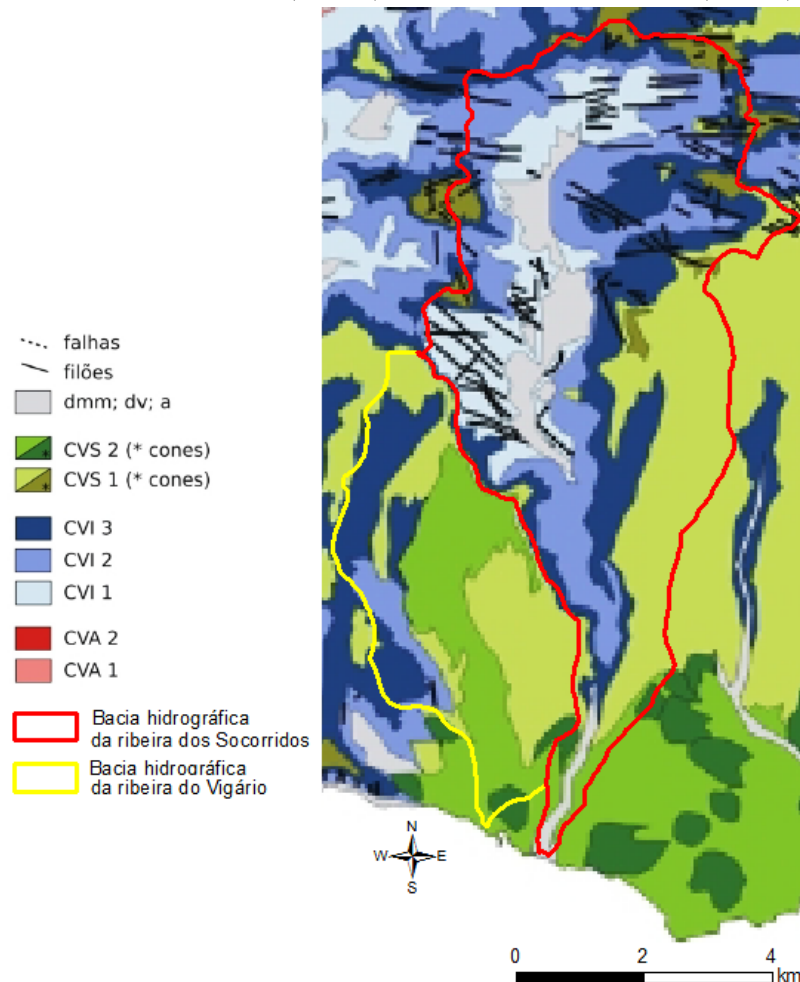


Figura 24 - Carta Geológica das bacias hidrográficas analisadas

(Fonte: Adaptado de Madeira, et. al.,2007)

Segundo Brum da Silveira *et. al.* (2008), o Complexo Vulcânico Intermédio é composto da seguinte forma:

- a unidade da Encumeada (CVI1) é constituída por produtos vulcânicos subaéreos de composição essencialmente máfica, às vezes muito alterados. Observam-se alternâncias de derrames lávicos com tufos de piroclastos de queda, emitidos por erupções de tipo estromboliano;
- a unidade da Penha d'Água (CVI2) compreende sequências vulcânicas máficas (basanitos e basaltos) resultantes de atividade efusiva e explosiva subaérea, de estilo estromboliano, havaiano e, ocasionalmente, do tipo freato-magmático, assim como, sequências sedimentares epiclásticas;
- a unidade do Curral das Freiras (CVI3) é constituída por sequências lávicas resultantes de atividade sobretudo efusiva subaérea, com ocasionais intercalações de depósitos piroclásticos de queda (escórias, lapilli e cinzas basálticas), níveis de tufitos e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática.

O Complexo Vulcânico Superior, está caracterizado em Brum da Silveira *et. al.* (2008) como:

- a unidade dos Lombos (CVS1) é composta predominantemente por derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), intercalados de tufitos, depósitos piroclásticos de queda (escórias, lapilli e cinzas basálticas) e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática.
- a unidade do Funchal (CVS2) apresenta manifestações vulcânicas subaéreas de derrames lávicos de composição mugarítica e derrames lávicos de composição máfica, intercalados ocasionalmente por piroclastos de queda (escórias, lapilli e cinzas basálticas) e produtos de atividade freato-magmática.

É possível verificar ainda na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos, depósitos de movimentos de massa (dmm), depósitos de vertente (dv) e aluviões (a). Os depósitos de movimentos de massa (ddm) resultam fundamentalmente da ação da gravidade sobre as vertentes de pendor elevado e grande desnível nos vales fluviais e ocorrem geralmente por tombamento. Os depósitos de vertente (dv), têm espessura variável e resultam da

queda continuada de fragmentos rochosos angulosos e porções de solo que se acumulam progressivamente no sopé da vertente ou em zonas de menor declive nas encostas. Os aluviões (a) são geralmente depósitos de cascalheira fluvial, com uma grande variedade de tamanho e grau de rolamento. A natureza dos clastos corresponde à dos litótipos presentes nas vertentes, tratando-se maioritariamente de rochas lávicas máficas.

3.2.3 Caracterização dos solos

Na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos, ao contrário do que acontece na maior parte da ilha da Madeira, o grupo de solos mais representativo é o Terreno Acidentado, nomeadamente o subgrupo Terreno Acidentado Dístrico (TAd), que está presente desde montante e vai afunilando em direção a jusante. Existe também uma pequena extensão a este e na zona central da bacia hidrográfica que pertence ao subgrupo dos Umbric Andosols (ANu). Por fim, junto à foz temos três subgrupos numa pequena extensão pouco representativa, temos o Terreno Acidentado Éutrico (TAe), Eutric Fluvisols (FLe) e Haplic Phaeozems (PHh).

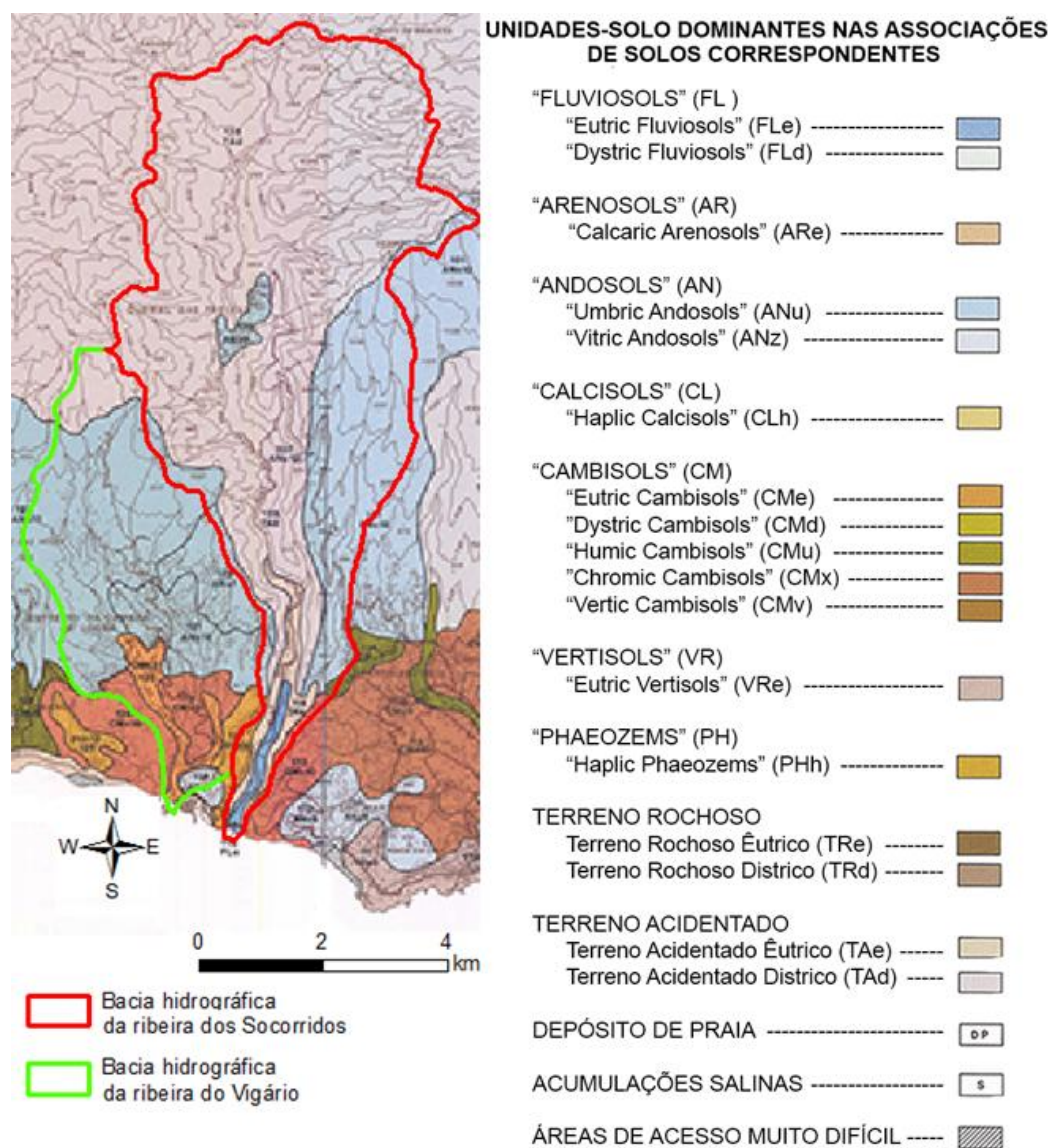


Figura 25 - Carta de solos das bacias hidrográficas analisadas

(Fonte: Adaptado da Carta de Solos da ilha da Madeira, 1992)

No que toca à bacia hidrográfica da ribeira do Vigário tal como na maior parte da ilha da Madeira, na zona central desta bacia encontra-se o grupo de solos que está presente em maioria, os Andosols (AN), mais concretamente os Umbric Andosols (ANu). Apenas uma pequena parte no extremo norte é composta por Terreno Acidentado Dístico (TAd), e na zona sul da bacia encontram-se outros tipos de solos como os Eutric Cambisols (CMe) e Chromic Cambisols, ambos pertencentes aos Cambisols (CL) e ainda uma pequena área com Vitric Andosols (ANz) e Haplic Phaeozems (PHh).

3.3 Características Geométricas

3.3.1 Metodologia

Hoje em dia, devido ao avanço tecnológico todos os dados geográficos encontram-se digitalizados. Recorrendo ao software de sistema de informação geográfica, nomeadamente o software *ArcGis*, é possível analisar os modelos digitais de terreno e obter assim todos os dados necessários para a caracterização da bacia hidrográfica. Para tal é utilizado essencialmente o módulo “*Spatial Analyst*” que disponibiliza ferramentas para a construção avançada e sofisticada de análises e para a criação de diferentes tipos de modelos espaciais.

Os modelos digitais de terreno foram fornecidos pela Direção de Serviços de Informação Geográfica e Cadastro da Região Autónoma da Madeira, sendo este um conjunto de ficheiros de cartografia em formato “*Raster*”, com toda a altimetria necessária para analisar as bacias hidrográficas.

3.3.2 Delimitação da bacia hidrográfica e da rede de drenagem

Nos modelos digitais de terreno existem *sinks*, ou seja, buracos ou depressões, onde existem erros nas áreas de drenagem interna e vazios, e é necessário preenche-los. Para isso utilizamos a ferramenta “*Fill*”, do “*ArcToolBox*”, para preencher todas as pequenas imperfeições de dados e remover todos os *sinks* do *raster* de superfície.

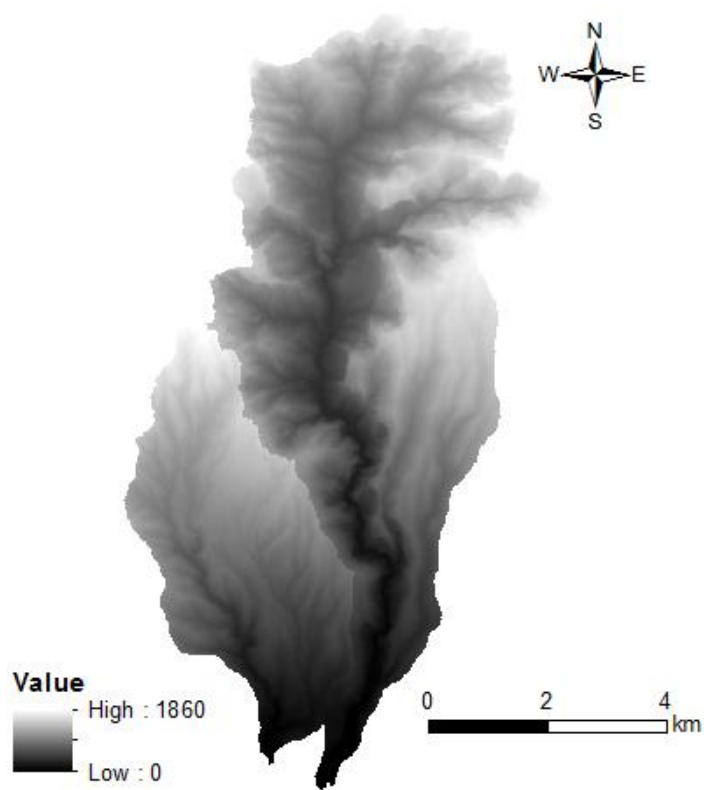


Figura 26 - Modelo digital terrestre após o comando “Fill”

Depois de removidas as imperfeições é necessário saber a direção do escoamento de cada célula. Com a ferramenta “*Flow Direction*” introduzimos o ficheiro *raster* anteriormente corrigido e esta dá-nos a direção e o valor do fluxo de cada célula do modelo digital do terreno. No “*Flow Direction*” cada *pixel* é potencialmente cercado por oito *pixels* vizinhos. A inclinação de cada uma destas oito direções é calculada analisando a diferença de elevação indicada pelo modelo digital terrestre para cada uma destas oito células vizinhas e do valor do *pixel* a ser examinado.

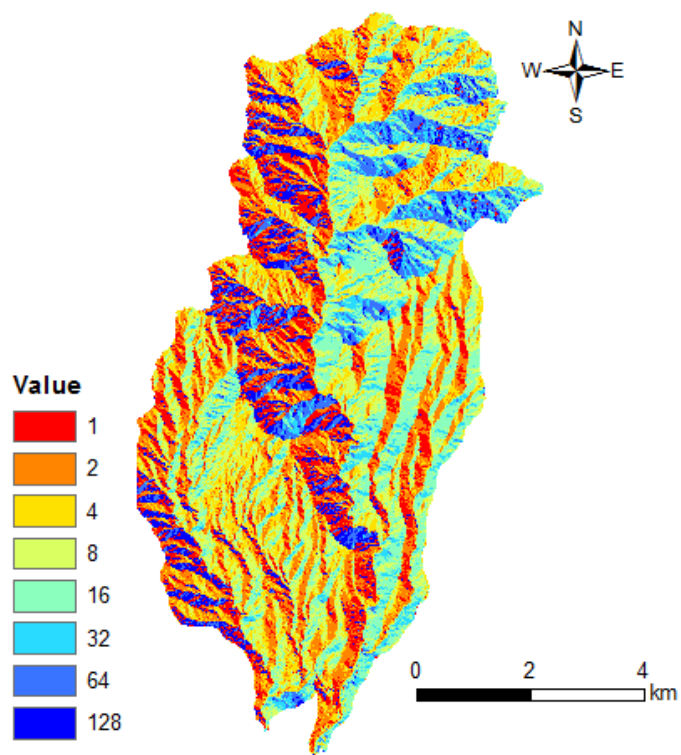


Figura 27 - Direção do escoamento depois de executar a ferramenta “*Flow Direction*”

O próximo passo é saber a acumulação do fluxo e para tal é utilizada a ferramenta “*Flow Accumulation*”, com a qual se cria um *raster*, com todos os valores de água em cada célula. Assim, as células que possuem valores mais elevados correspondem aos pontos de maior acumulação de água, formando assim a rede de drenagem.

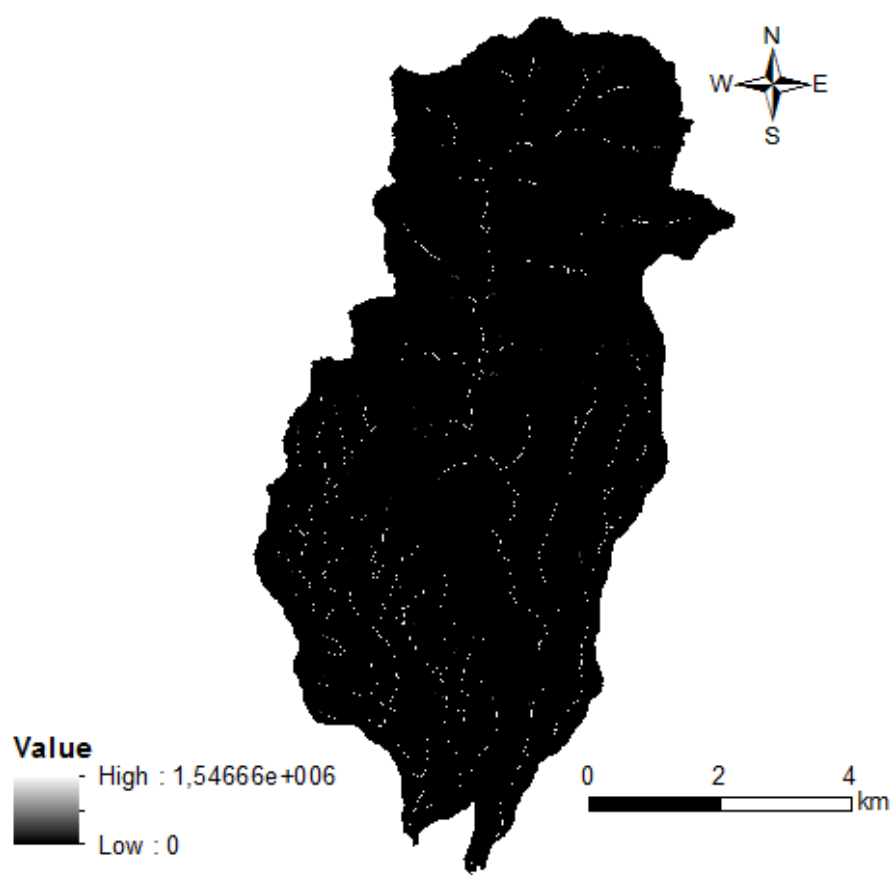


Figura 28 - Pontos de maior acumulação de água após utilizar “*Flow Accumulation*”

Para extrair a rede de drenagem é necessário usar o “*Raster Calculator*”, em que é inserida a seguinte expressão condicional “*Con(“FlowAccumulation” > 500,1)*”. Esta expressão condicional, não é mais que um teste lógico que retorna um resultado, ou seja, isto significa que todas as células do *raster* com valor superior a 500 *pixels* serão consideradas durante a criação da rede de drenagem, as que têm valor inferior não lhes é atribuído qualquer valor.

A rede de drenagem já está criada, mas é preciso definir e identificar cada um dos troços. Para tal utiliza-se a ferramenta “*Stream Link*”, obtendo assim cada um dos troços da rede de drenagem devidamente identificado e individualizado.

Para criar a rede de drenagem, é utilizada a ferramenta “*Stream to Feature*” para vetorizar todos os cursos de água. Após esta operação a rede de drenagem fica definida e pronta para outro tipo de análises, nomeadamente a hierarquização da rede pelo método de Strahler e a magnitude da rede pelo método de Shreve.

Após estes processos todos já é possível definir a bacia hidrográfica em estudo. Para isso é utilizado a opção “*Watershed*”, que delimita a bacia hidrográfica. Através da interpolação com mapas digitais é possível proceder à localização exata da bacia hidrográfica como demonstrado na figura 29.

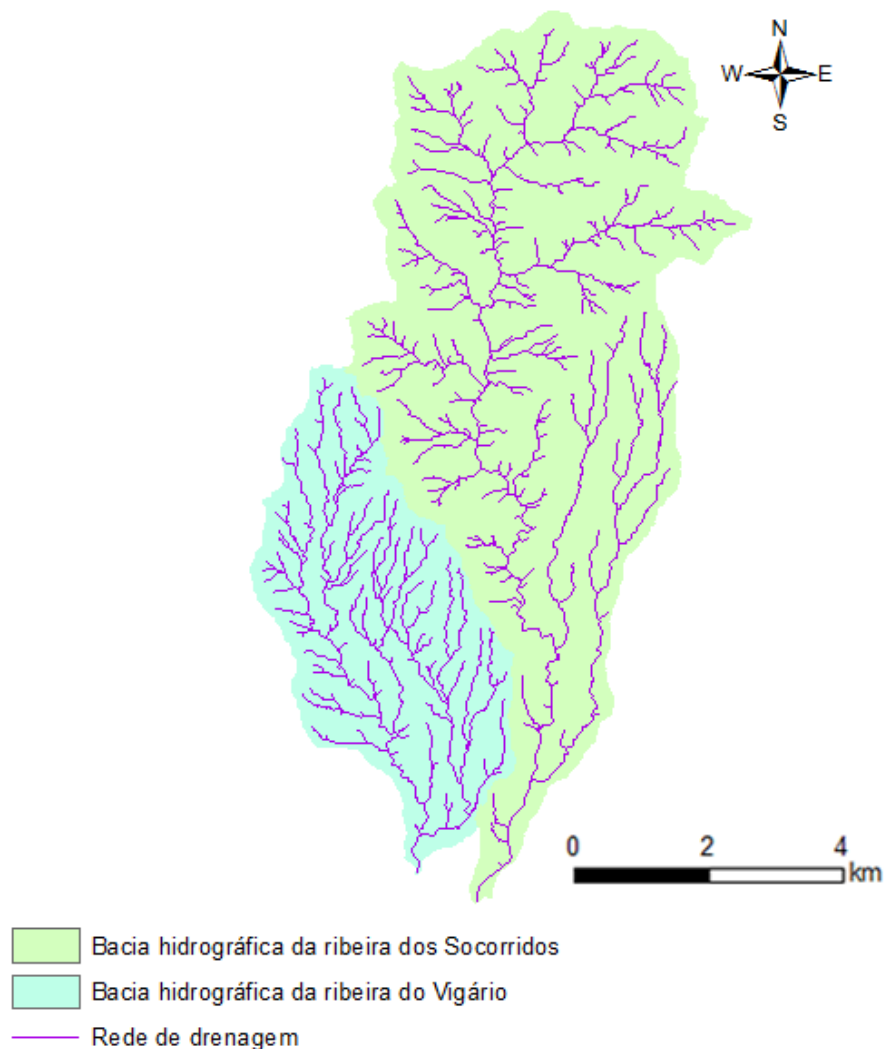


Figura 29 - Delimitação e rede de drenagem das bacias hidrográficas analisadas

3.3.3 Área e Perímetro da bacia hidrográfica

A área da bacia hidrográfica é a projeção no plano horizontal da área de drenagem do sistema pluvial. O perímetro é o comprimento da linha que delimita a área da bacia hidrográfica, representada no plano horizontal.

Ambos estes valores foram determinados através de cálculo automático do software de sistema de informação geográfico. No anexo 1 encontra-se a tabela de atributos referente

ao cálculo da área e do perímetro da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos e da ribeira do Vigário.

Tabela 5 - Valores da área e do perímetro das bacias hidrográficas analisadas

	Área da bacia hidrográfica (A)	Perímetro da bacia hidrográfica (P)
Ribeira dos Socorridos	38,74 km ²	37,50 km
Ribeira do Vigário	15,42 km ²	19,91 km

3.3.4 Fatores relacionados com a forma da bacia hidrográfica

A forma planimétrica da bacia pode exercer uma grande influência no regime do curso de água, principalmente nos caudais de cheia. Os aspetos a ter em conta, quanto à forma da bacia hidrográfica são: o índice de compacidade de Gravelius (K_C), o índice de alongamento (K_L) e o fator de forma (K_F).

a) Índice de compacidade de Gravelius (K_C):

O índice de compacidade de Gravelius (K_C) faz a relação entre o perímetro da bacia (P) e o perímetro de um círculo de igual área. Este coeficiente é adimensional, varia com a forma da bacia, independentemente do seu tamanho; quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o respetivo coeficiente de compacidade. Este é definido através da seguinte equação:

$$K_C = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Os valores que caracterizam a bacia hidrográfica através do índice de compacidade de Gravelius (K_C) são:

- $K_C = 1$ define uma bacia circular;
- $K_C < 1,128$ define uma bacia arredondada;
- $K_C = 1,128$ define uma bacia quadrada;
- $K_C > 1,128$ é necessário calcular o índice de alongamento (K_L).

$$K_{C \text{ Socorridos}} = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,282 \frac{37,50}{\sqrt{38,74}} = 1,70 \quad (2)$$

$$K_{C_{Vigário}} = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,282 \frac{19,91}{\sqrt{15,42}} = 1,43 \quad (3)$$

Em ambos os casos o índice de compacidade de Gravelius é superior a 1,128 logo é necessário calcular o índice de alongamento (K_L).

b) Índice de alongamento (K_L):

O índice de alongamento (K_L) é a relação entre o comprimento (L) e largura (b) de um retângulo equivalente. O índice de alongamento (K_L) é expresso pela seguinte equação:

$$K_L = \frac{L}{b} \quad (4)$$

Sendo que:

$$L = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,128} \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C} \right)^2} \right| \quad (5)$$

$$b = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,128} \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C} \right)^2} \right| \quad (6)$$

Caso o índice de alongamento (K_L) seja superior a 2, a bacia hidrográfica é considerada alongada.

Assim, substituindo os valores de K_C e A , nas equações 5 e 6 temos para a bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos:

$$L_{Socorridos} = \frac{1,70 \times \sqrt{38,74}}{1,128} \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,70} \right)^2} \right| = 16,40 \text{ km} \quad (7)$$

$$b_{Socorridos} = \frac{1,70 \times \sqrt{38,74}}{1,128} \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,70} \right)^2} \right| = 2,36 \text{ km} \quad (8)$$

E para a bacia hidrográfica da ribeira do Vigário:

$$L_{Vigário} = \frac{1,70 \times \sqrt{15,42}}{1,128} \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,43} \right)^2} \right| = 9,56 \text{ km} \quad (9)$$

$$b_{Vigário} = \frac{1,70 \times \sqrt{15,42}}{1,128} \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,43} \right)^2} \right| = 2,28 \text{ km} \quad (10)$$

Então, o valor do índice de alongamento (K_L) é:

$$K_{L_{Socorridos}} = \frac{L}{b} = \frac{16,40}{2,36} = 6,95 \quad (11)$$

$$K_{L_{Vigário}} = \frac{L}{b} = \frac{9,56}{2,28} = 4,19 \quad (12)$$

Então como K_L é muito superior a 2, temos bacias alongadas e isto traduz-se num menor risco de cheia porque os seus percursos são mais longos, há um maior tempo de escoamento e um maior tempo de resposta.

c) Fator de forma (K_F):

O fator de forma expressa a relação entre a largura média (l) e o comprimento axial da bacia (L). A largura média da bacia (l) é definida pela razão entre o comprimento da bacia (L) e a sua área (A). Assim o fator de forma (K_F) é definido pela seguinte equação:

$$K_F = \frac{l}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (13)$$

Uma bacia com um fator de forma baixo encontra-se menos exposta à ocorrência de cheias, que outra do mesmo tamanho com um fator de forma superior, já que na bacia alongada a probabilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo a totalidade da bacia é pequena.

$$K_{F_{Socorridos}} = \frac{A}{L^2} = \frac{38,74}{17,67^2} = 0,12 \quad (14)$$

$$K_{F \text{ Vigário}} = \frac{A}{L^2} = \frac{15,42}{7,56^2} = 0,27 \quad (15)$$

Como K_F é muito baixo em ambos os casos, as bacias estão menos expostas à ocorrência de cheias, porque como são bacias estreitas e longas, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a sua extensão.

3.4 Características do Relevo

3.4.1 Curva hipsométrica

Através da curva hipsométrica é possível caracterizar o relevo e a altimetria de uma bacia hidrográfica, relacionando as altitudes da superfície do terreno (em ordenadas), com as áreas da bacia situadas acima dessas altitudes (em abcissas). Assim, podemos afirmar que está representado graficamente o relevo da bacia hidrográfica. Esta representa o estudo da variação da elevação dos vários terrenos da bacia em relação ao nível médio do mar. Através desta curva hipsométrica é possível determinar a altitude máxima, a altitude mínima, bem como a altitude média.

Para definir a curva hipsométrica, foram utilizados os modelos digitais terrestres da bacia no software *ArcGis*. Foram definidas curvas de nível de 100 em 100 metros e foi possível obter através do cálculo automático deste software a área correspondente entre cada curva de nível desde a foz até o ponto mais alto da bacia hidrográfica. Na figura 30 está representado o mapa hipsométrico da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos e da Ribeira do Vigário obtido através do software *ArcGis*.

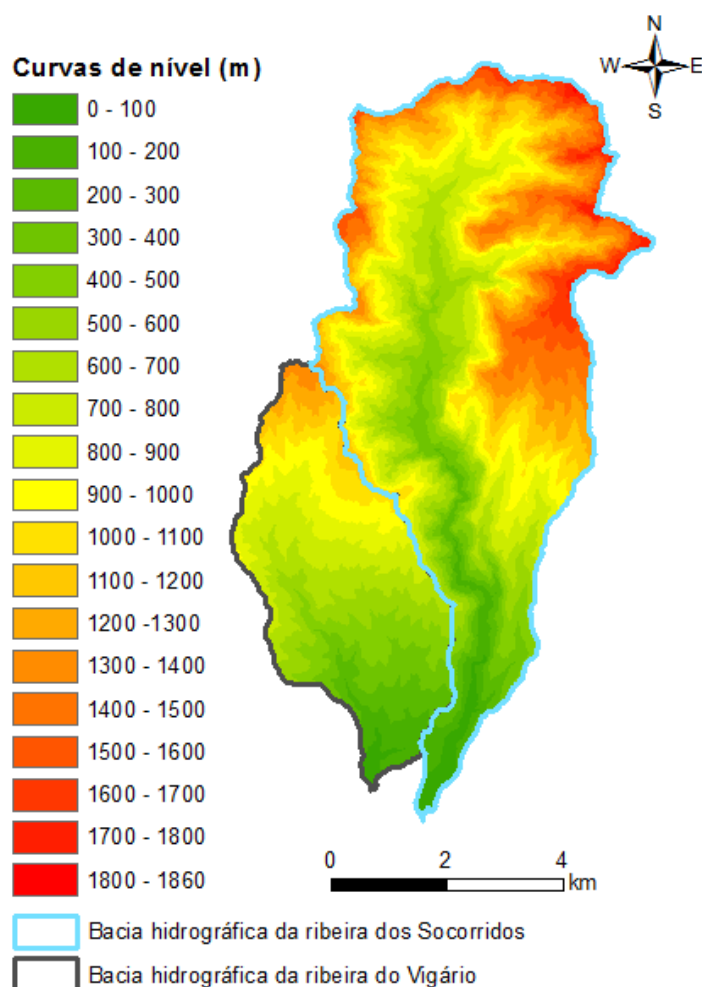


Figura 30 - Mapa hipsométrico das bacias hidrográficas

Através da visualização da tabela de atributos deste mapa hipsométrico no software *ArcGis* foi possível determinar a altitude máxima da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos que foi de $Z_{\text{máx}} = 1860$ m e da ribeira do Vigário foi de $Z_{\text{máx}} = 1410$ m. Relativamente à altitude mínima, visto que ambas as bacias desaguam no oceano Atlântico então a sua altitude mínima, é $Z_{\text{min}} = 0$ m.

A altitude média (Z_{med}), relaciona o volume abaixo da superfície do terreno com a área da bacia, e obtém-se pela seguinte fórmula:

$$Z_{\text{med}} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} (z_i + z_{i+1}) A_i \quad (16)$$

Através dos dados presentes no anexo 2, foi possível determinar a altitude média da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos e da ribeira do Vigário.

$$Z_{\text{med Socorridos}} = 931,41 \text{ m} \quad (17)$$

$$Z_{medVigário} = 663,84 \text{ m} \quad (18)$$

Relativamente à altura média (h_{med}) das bacias hidrográficas, esta coincide com a altitude média pois a altitude mínima da bacia hidrográfica é de 0 metros, logo não terá influência neste parâmetro.

$$h_{medSocorridos} = Z_{med} - Z_{min} = 931,41 \text{ m} \quad (19)$$

$$h_{medVigário} = Z_{med} - Z_{min} = 663,84 \text{ m} \quad (20)$$

Após estes cálculos e através das tabelas presentes no anexo 2 foi possível determinar as respetivas curvas hipsométricas das bacias hidrográficas.

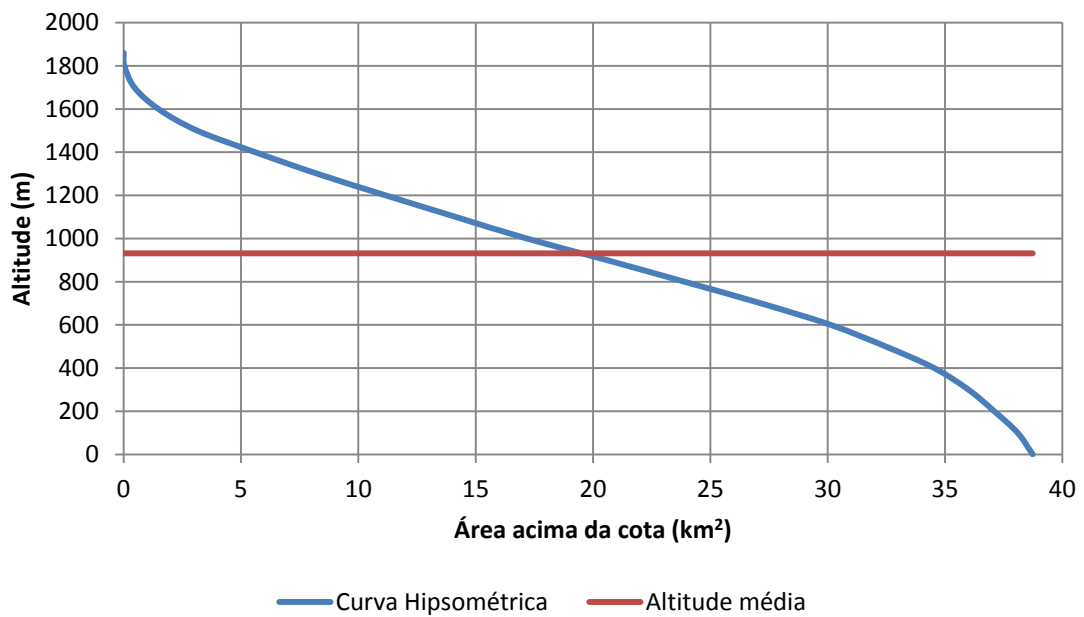


Figura 31 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

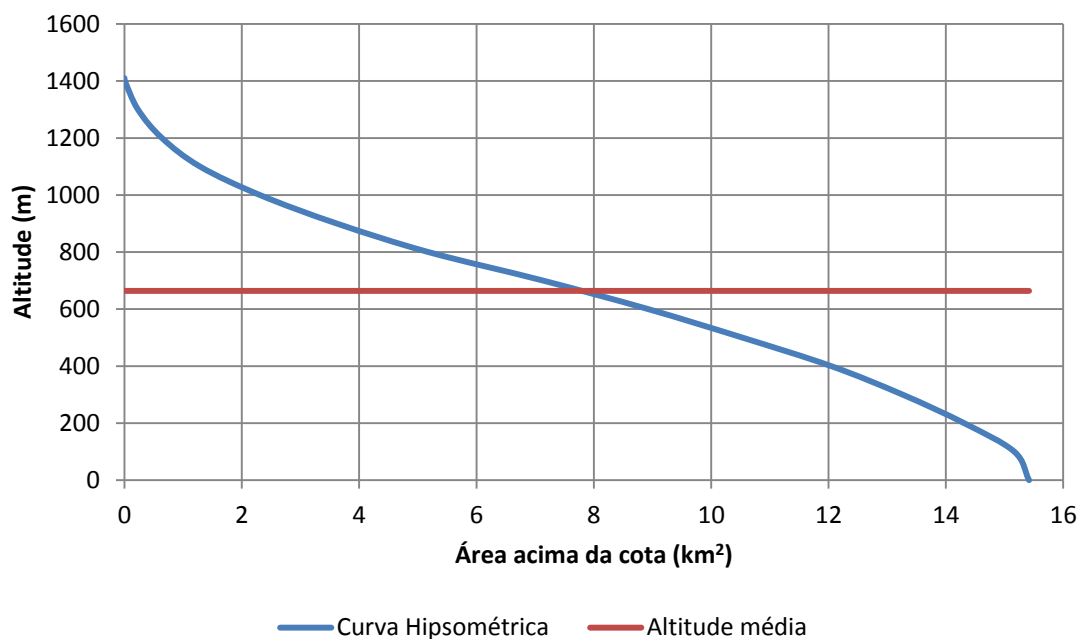


Figura 32 - Curva hipsométrica da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

3.4.2 Curva hipsométrica adimensional

A curva hipsométrica adimensional relaciona as altitudes da superfície do terreno (em ordenadas), com as áreas expressas em percentagem da área total (em abcissas). Através desta é possível determinar a evolução geomorfológica de uma bacia hidrográfica. Os estados de maturidade podem ser três, jovem, intermédia ou antiga, como se pode verificar na figura seguinte.

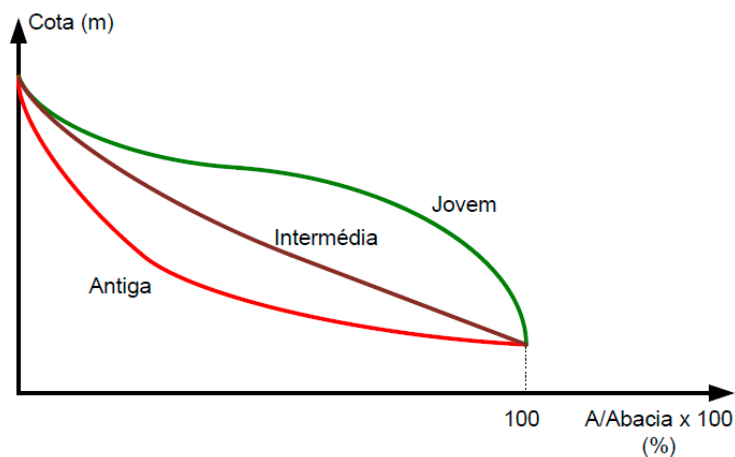


Figura 33 - Estado de maturidade de uma bacia hidrográfica

Através das tabelas presentes no anexo 2, cujas áreas entre as curvas de nível definidas de 100 em 100 metros através do software *ArcGis*, foi possível determinar as curvas hipsométricas adimensional das bacias hidrográficas em estudo.

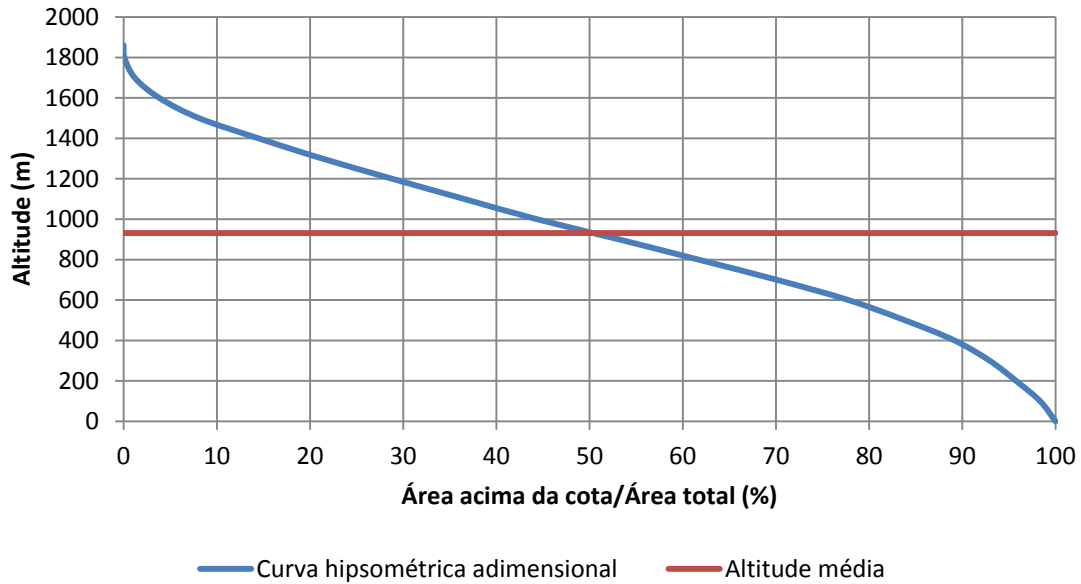


Figura 34 - Curva hipsométrica adimensional da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

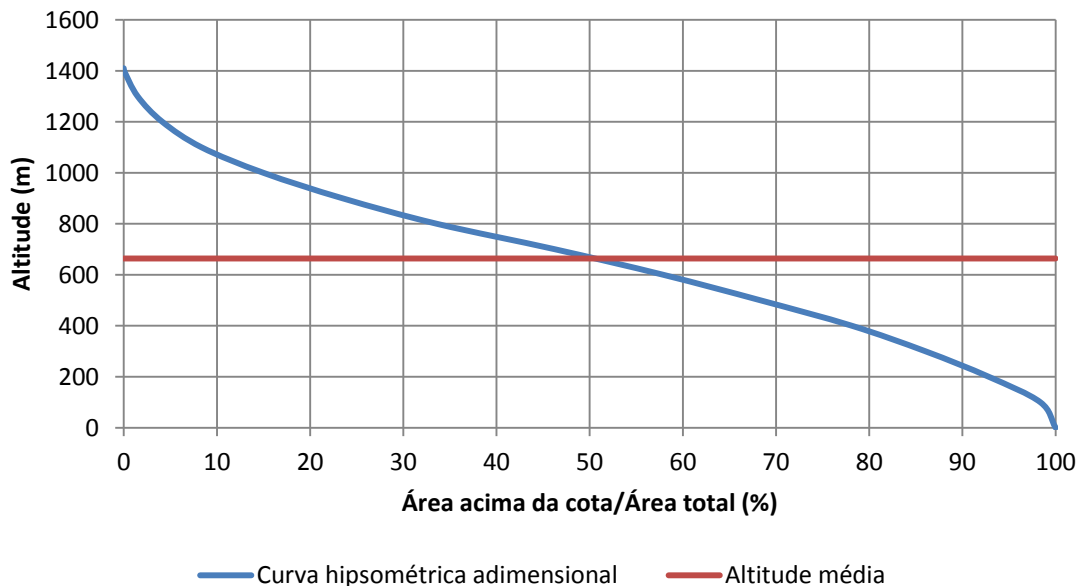


Figura 35 - Curva hipsométrica adimensional da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

Em comparação com os estados de maturidade verifica-se que ambas as bacias hidrográficas têm o perfil de uma bacia relativamente jovem, ou seja, ainda está pouco erodida.

3.4.3 Perfil longitudinal dos cursos de água principal

O perfil longitudinal de um curso de água relaciona, em cada ponto, as cotas do seu leito com a distância do ponto até à foz, medida ao longo do curso de água.

Para definir o curso de água principal, utilizou-se o software *ArcGis* e foi feita uma medição exaustiva dos cursos de água, com curvas de nível com 50 metros de equidistância e obtiveram-se os seguintes dados:

Tabela 6 - Principais características dos cursos de água principal

	Comprimento do curso de água principal	Altitude máxima do curso de água principal
Ribeira dos Socorridos	17673,12 m	1475 m
Ribeira do Vigário	9415,21 m	1320 m

Através da figura 36 é possível obter uma melhor visualização da localização dos cursos de água principal de cada uma das bacias hidrográficas em estudo.

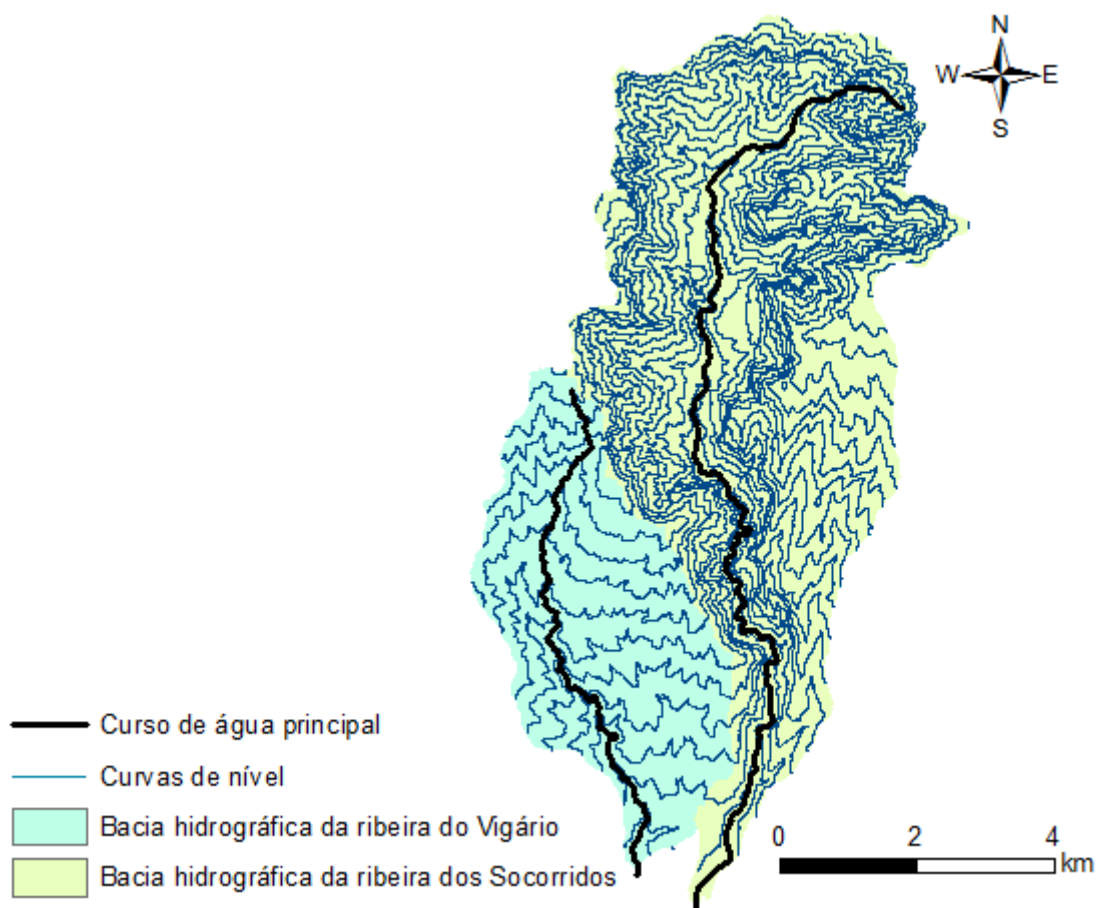


Figura 36 - Cursos de água principal das bacias hidrográficas

Depois da medição exaustiva dos cursos de água principal desde o seu ponto mais alto até à foz, obtiveram-se as tabelas presentes no anexo 3, através das quais foi possível representar graficamente os perfis longitudinais dos cursos de água principal.

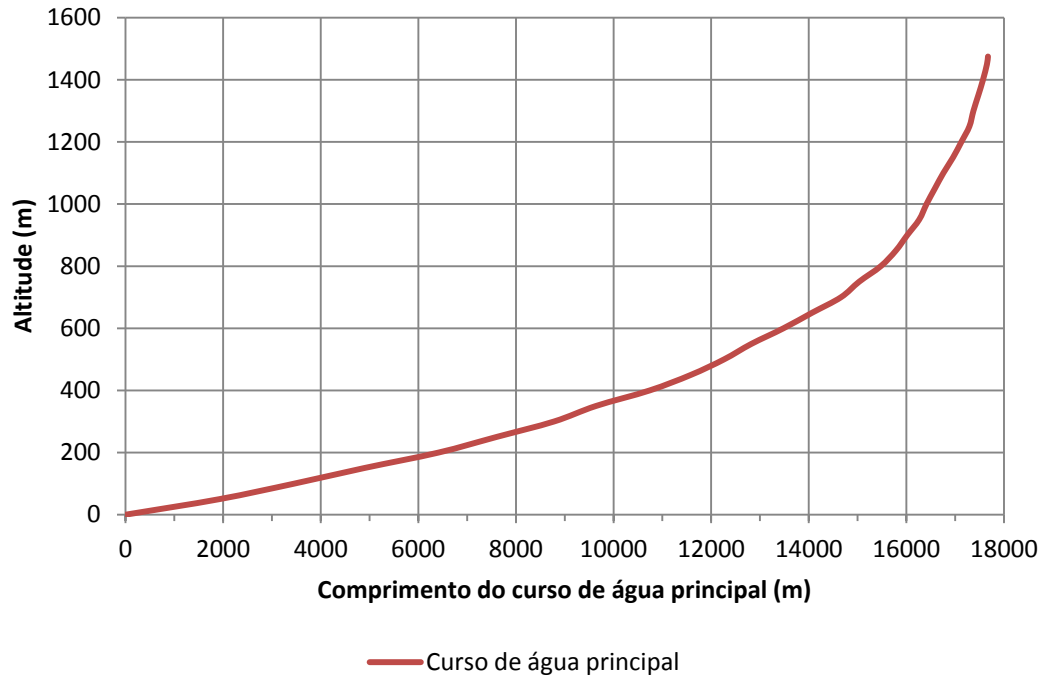


Figura 37 - Perfil longitudinal do curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

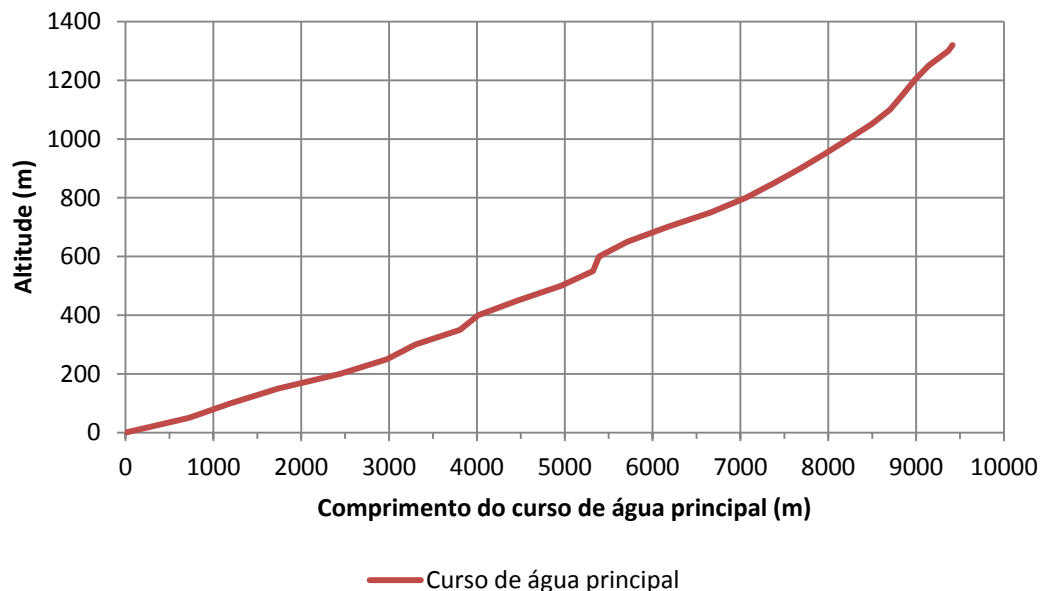


Figura 38 - Perfil longitudinal do curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

O perfil longitudinal do curso de água principal tem uma grande importância no comportamento da bacia, devido ao facto dos declives do leito influenciarem as velocidades de escoamento.

3.4.4 Declive médio do curso de água principal

O declive médio (i_{med}) relaciona a diferença entre a altitude máxima (Z_{max}) e a altitude mínima (Z_{min}), com o comprimento do curso de água principal (L). O declive médio é definido assim da seguinte forma:

$$i_{medSocorridos} = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{L} = \frac{1475 - 0}{17672,13} = 0,083 \quad (21)$$

$$i_{medVigário} = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{L} = \frac{1320 - 0}{9415,21} = 0,140 \quad (22)$$

3.4.5 Declive Equivalente do curso de água principal

O declive equivalente (i_{eq}) corresponde ao declive da reta que subtende, com o eixo das abcissas, uma área idêntica á do perfil longitudinal, ou seja, o declive da reta que, intersectando o perfil longitudinal, determina abaixo e acima deste, áreas iguais. Para obter o declive equivalente é necessário primeiro calcular a altura equivalente (Z_{eq}):

$$Z_{eqSocorridos} = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{n-1} (Z_i + Z_{i+1}) X_{i+1} - Z_{min} = 787,90 \text{ m} \quad (23)$$

$$Z_{eqVigário} = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{n-1} (Z_i + Z_{i+1}) X_{i+1} - Z_{min} = 1049,13 \text{ m} \quad (24)$$

Ao saber a altura equivalente (Z_{eq}), já é possível calcular o declive equivalente (i_{eq}):

$$i_{eqSocorridos} = \frac{Z_{eq} - Z_{min}}{L} = \frac{787,90 - 0}{17672,13} = 0,045 \quad (25)$$

$$i_{eqVigário} = \frac{Z_{eq} - Z_{min}}{L} = \frac{1049,13 - 0}{9415,21} = 0,111 \quad (26)$$

3.4.6 Declive 10-85 do curso de água principal

O declive 10-85 (i_{10-85}) elimina os trechos de maior e menor declive, ou seja, o trecho que se situa nos 10% iniciais e 15% finais do comprimento total do curso de água principal. Através do software *ArcGis* obtiveram-se os valores correspondente a Z_{85} e Z_{10} e o declive foi obtido da seguinte forma:

$$i_{10-85 \text{ Socorridos}} = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0,75 L} = \frac{798,52 - 46,02}{0,75 \times 17672,13} = 0,057 \quad (27)$$

$$i_{10-85 \text{ Vigário}} = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0,75 L} = \frac{957,61 - 73,08}{0,75 \times 9415,21} = 0,125 \quad (28)$$

3.4.7 Índice de Relevô

O índice de relevô ($i_{\text{relevô}}$) relaciona a amplitude altimétrica (A_{alt}) com o comprimento da bacia hidrográfica (C_b), medido paralelamente ao curso de água principal. Quanto maior for o índice de relevô mais rápida se dará a chegada das águas à foz, visto que este indicador da inclinação influencia fortemente a velocidade de escoamento.

A amplitude altimétrica (A_{alt}) é expressa pela diferença entre a altitude máxima (Z_{max}) e a altitude mínima (Z_{min}) em metros e o comprimento da bacia hidrográfica (C_b) foi obtido com o recurso ao software *ArcGis* e também é expresso em metros.

$$i_{\text{relevôSocorridos}} = \frac{A_{\text{alt}}}{C_b} = \frac{1860}{13160,27} = 0,141 \quad (29)$$

$$i_{\text{relevôVigário}} = \frac{A_{\text{alt}}}{C_b} = \frac{1410}{7562,54} = 0,186 \quad (30)$$

3.4.8 Declive médio da bacia

Com recurso ao software *ArcGis* foi possível através do comando “*Slope*” visualizar e localizar as vertentes das bacias hidrográficas em estudo. Estas apresentam em grande parte declives elevados, sendo que o máximo que se verificou foi de 86,5° na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos, atingindo assim quase a verticalidade.

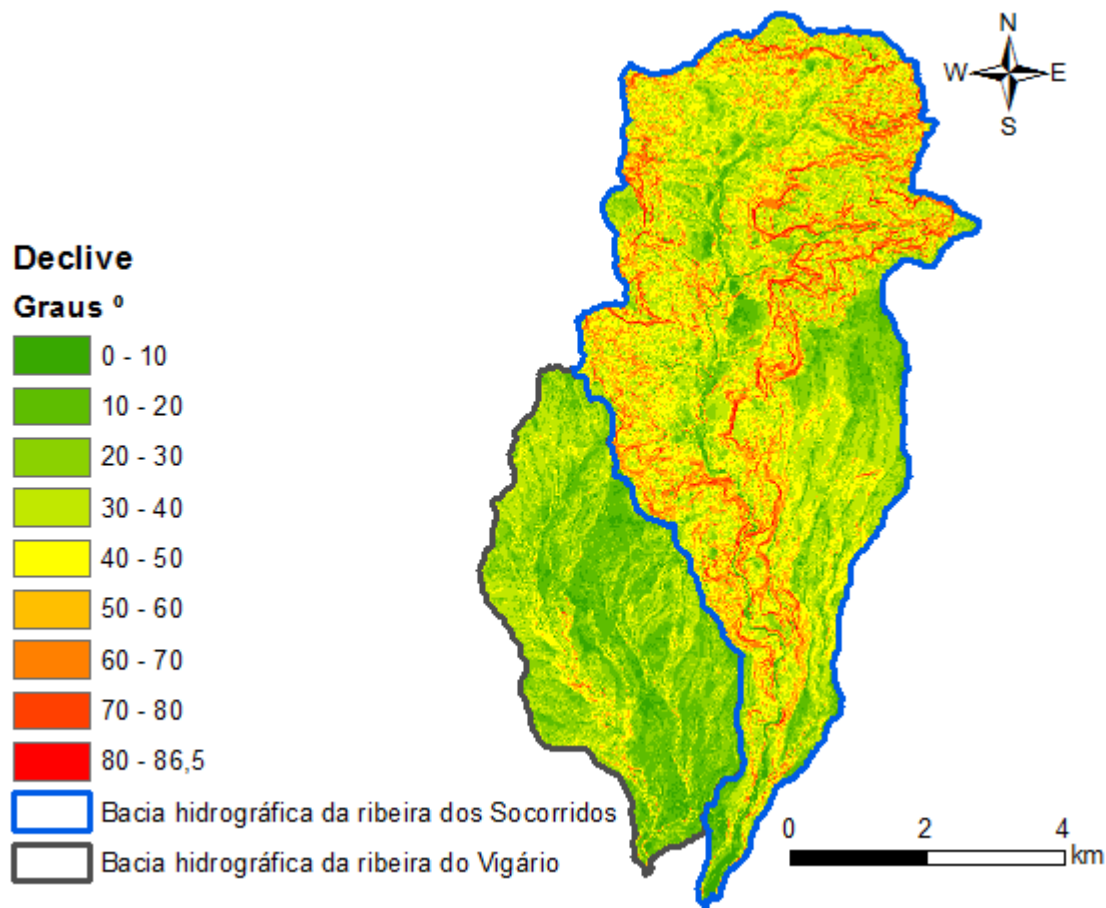


Figura 39 - Mapa de declives das bacias hidrográficas

Através dos resultados obtidos pela tabela de atributos, foi possível calcular o declive médio em graus e em percentagem das bacias hidrográficas.

Tabela 7 - Declive médio das bacias hidrográficas

	Declive médio (graus)	Declive médio (%)
Ribeira dos Socorridos	40,76°	86,20 %
Ribeira do Vigário	24,97°	46,57 %

3.5 Características da rede de drenagem

3.5.1 Rede de drenagem

A rede de drenagem é um sistema natural, composto por diversos canais que interligados é capaz de transportar a água superficial, essencialmente proveniente das chuvas, até à foz.

Uma rede de drenagem pode ter diversos formatos desde os mais complexos aos mais simples, dependendo do seu tipo de ramificação. Os mais comuns são as redes de drenagem de forma dendrítica, radial, angular e paralela.

Relativamente ao tipo de drenagem da rede existem duas formas distintas, a endorreica quando o curso de água não flui para o mar ou oceano, e a exorreica quando o curso de água tem saída para o mar ou oceano.

No que toca à bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos e à da ribeira do Vigário ambas possuem uma rede de drenagem de forma dendrítica visto as linhas de água correrem em todas as direções e esta rede assemelhar-se a ramos de uma árvore. Quanto ao tipo de drenagem da rede, como ambas as bacias hidrográficas desaguam no oceano Atlântico estas classificam-se como exorreica.

3.5.2 Hierarquização pelo método de Strahler

Este método consiste no estudo do grau de ramificação da rede hidrográfica, dando uma ordem a cada curso de água existente.

Como é possível verificar na figura 40, este método é muito simples. Quando se juntam duas linhas de água de ordem “1”, formam uma de ordem “2”, quando se juntam duas linhas de ordem “2”, dão origem a uma linha de ordem “3”, e assim sucessivamente. Caso se juntem uma linha de ordem “1” e uma de ordem “3”, a linha de água que originará será uma de ordem “3”.

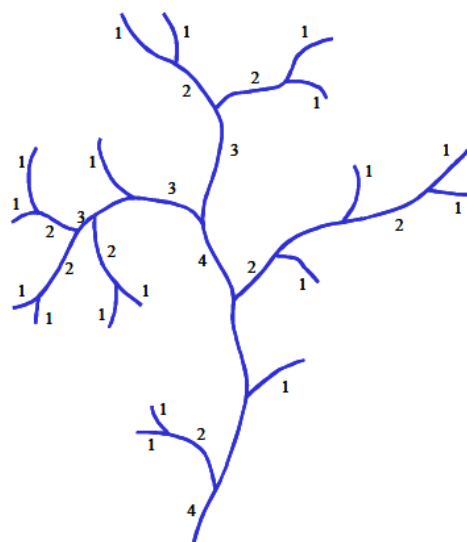


Figura 40 - Exemplo de hierarquização pelo método de Strahler

Para aplicar este método nas bacias hidrográficas da ribeira dos Socorridos e da ribeira do Vigário foi utilizado novamente o software *ArcGis* que através da sua análise automática através da ferramenta “*Stream Order*”, onde é possível escolher a utilização do método de Strahler.

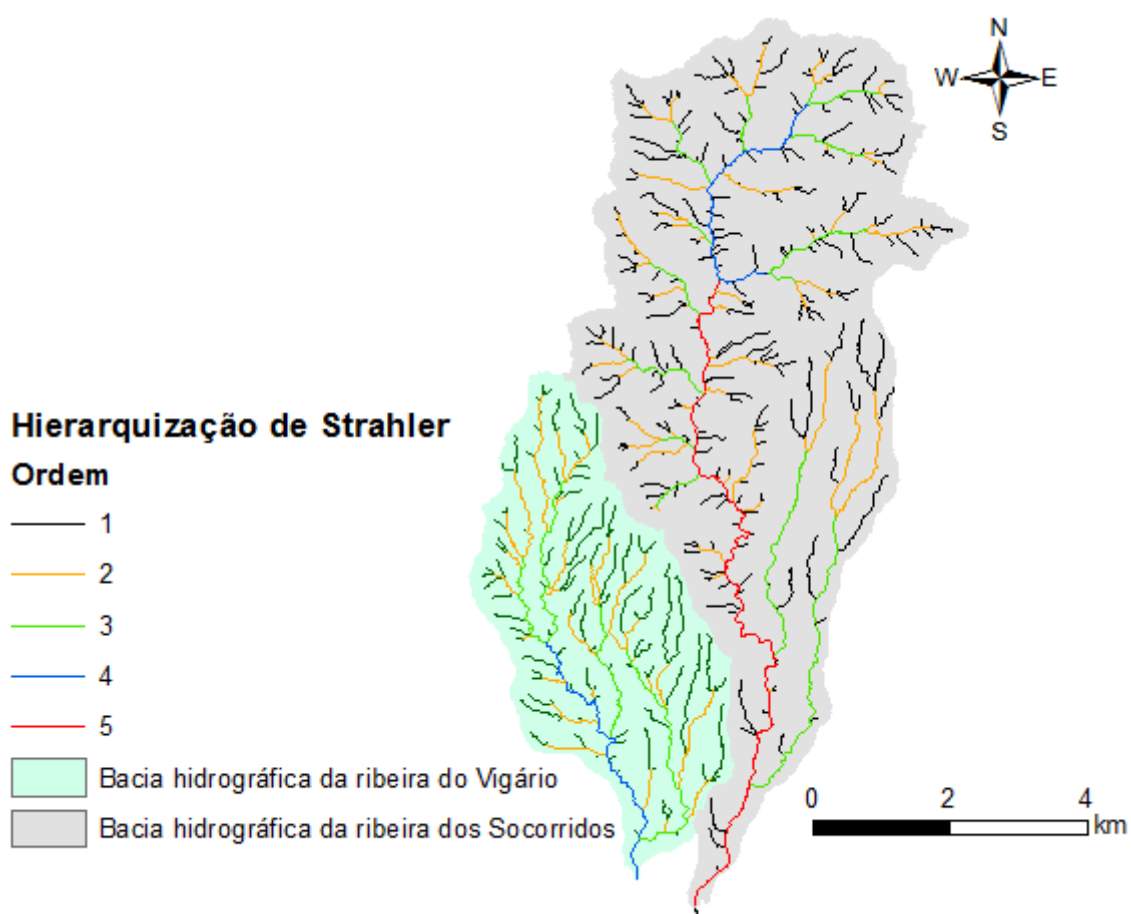


Figura 41 - Hierarquização pelo método de Strahler nas bacias hidrográficas

Após esta análise e ao consultar a tabela de atributos no software *ArcGis* obteve-se a seguinte tabela, onde é possível consultar a ordem, o número de cursos de água e o comprimento.

Tabela 8 - Dados da hierarquização pelo método de Strahler

	Ordem	Número de troços	Comprimento (km)
Ribeira dos Socorridos	1	279	62,486
	2	104	25,670
	3	71	20,302
	4	27	4,587
	5	47	12,212
Ribeira do Vigário	1	104	34,763
	2	56	20,109
	3	31	10,873
	4	16	4,919

3.5.3 Hierarquização pelo método de Shreve

A hierarquização pelo método de Shreve é outra forma de classificar a magnitude de uma rede de drenagem. Neste método as magnitudes são somadas sempre que há uma junção de dois cursos de água.

Na figura 42 está representado um exemplo da aplicação da hierarquização pelo método de Shreve. Quando, por exemplo, dois cursos de magnitude “2” se unem, o trecho a jusante designa-se de magnitude “4”, ou quando se juntam um curso de magnitude “11” e outro de magnitude “4”, a linha de água a jusante é de magnitude “15”, e assim sucessivamente. Desta forma classifica-se a hierarquização pelo método de Shreve, sendo que desta forma algumas magnitudes podem não existir.

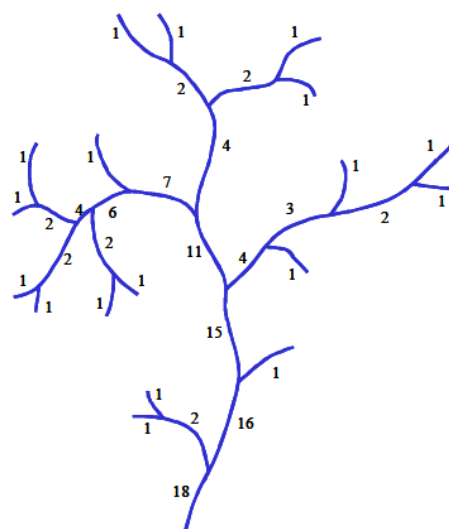


Figura 42 - Exemplo da hierarquização pelo método de Shreve

Através do comando “*Stream Order*” e selecionando o método de Shreve no software *ArcGis* foi possível fazer esta classificação para ambas as bacias hidrográficas.

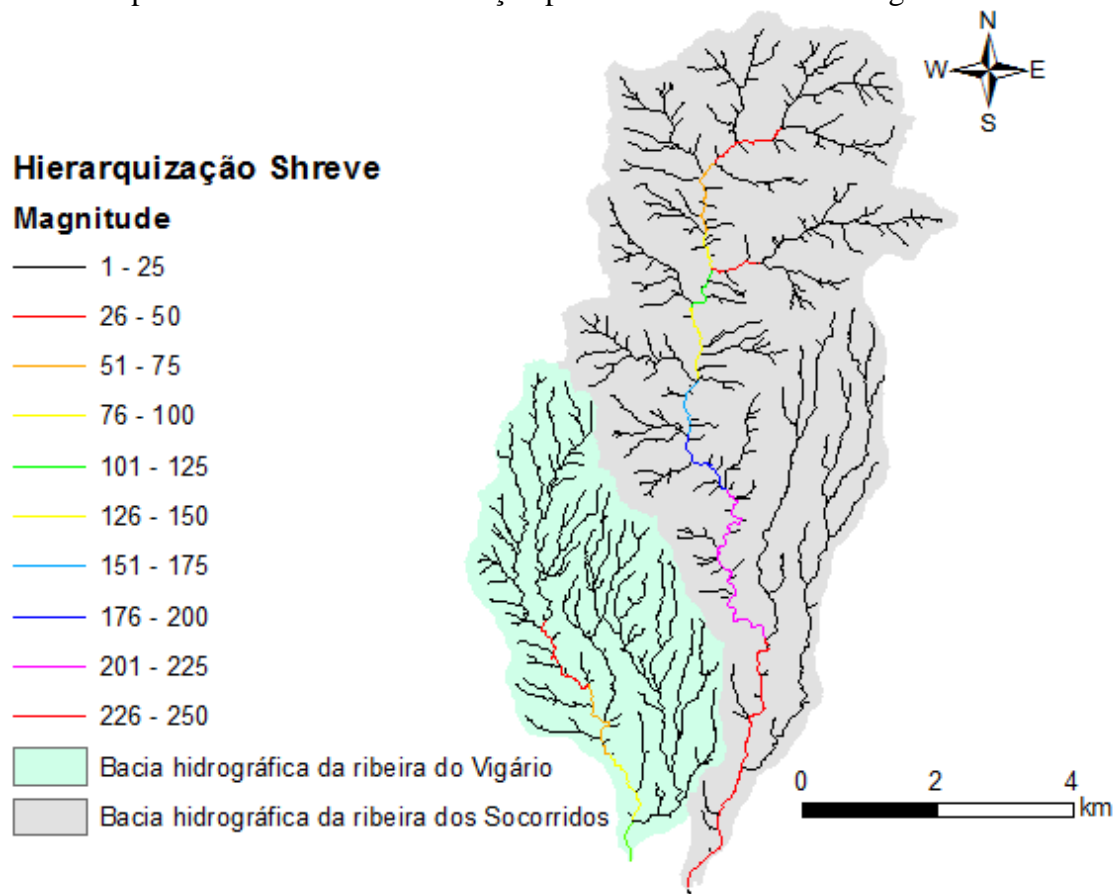


Figura 43 - Hierarquização pelo método de Shreve nas bacias hidrográficas

Após este resultado verifica-se que a bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos tem uma magnitude de 250 pelo método de Shreve e a da ribeira do Vigário uma magnitude de 104.

3.5.4 Relação de bifurcação

A relação de bifurcação (R_b) relaciona o número total de segmentos de uma certa ordem (N_u) e o número total dos de ordem imediatamente superior (N_{u+1}), sendo o valor de ordem determinado na hierarquização pelo método de Strahler.

Quanto maior o valor da relação de bifurcação maior a condição de erosão provocada pela bifurcação das linhas de água. Esta relação é expressa pela seguinte fórmula:

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (31)$$

Tabela 9 - Relação de bifurcação nas bacias hidrográficas

	Ordem	Número de segmentos (N_u)	Relação de bifurcação (R_b)
Ribeira dos Socorridos	1	279	2,68
	2	104	1,46
	3	71	2,63
	4	27	0,57
	5	47	-
Ribeira do Vigário	1	104	1,86
	2	56	1,81
	3	31	1,94
	4	16	-

Com os valores da relação de bifurcação de cada ordem é possível determinar a relação de bifurcação média ($\overline{R_b}$) através da seguinte fórmula:

$$\overline{R_b}_{Socorridos} = \sqrt{\prod_{u=1}^{n-1} \frac{N_u}{N_{u+1}}} = n\sqrt{N_1} = 5\sqrt{2,68 \times 1,46 \times 2,63 \times 0,57} = 1,56 \quad (32)$$

$$\overline{R_b}_{Vigário} = \sqrt{\prod_{u=1}^{n-1} \frac{N_u}{N_{u+1}}} = n\sqrt{N_1} = 4\sqrt{1,86 \times 1,81 \times 1,94} = 1,87 \quad (33)$$

3.5.5 Tempo de Concentração

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica (t_c), é o tempo indispensável para que toda a sua área colabore para o escoamento superficial na secção de saída, por outras palavras, pode ser definido como o tempo necessário para que uma gota de água que cai no sítio hidráulicamente mais distante da bacia chegue à secção de saída.

Os fatores que influenciam o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica são: a área e a forma da bacia; declividade média da bacia; tipo de cobertura vegetal; comprimento e declividade do curso principal; comprimento e declividade dos afluentes; distância horizontal entre o ponto mais afastado da bacia e a sua saída e coeficiente de rugosidade do canal de escoamento.

Existem diversas fórmulas para o cálculo do tempo de concentração:

Fórmula de Témez:

$$t_{c\text{Témez}} = 0,3 \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (34)$$

$t_{c\text{Témez}}$ - tempo de concentração em horas;

L - comprimento do curso de água principal em km;

i - declividade da bacia hidrográfica em %.

Fórmula de Ven Te Chow:

$$t_{c\text{Ven Te Chow}} = 0,8773 \left(\frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0,64} \quad (35)$$

$t_{c\text{Ven Te Chow}}$ - tempo de concentração em horas;

L - comprimento do curso de água principal em km;

i - declividade do curso de água principal em m/km.

Fórmula de Giandotti:

$$t_{c\text{Giandotti}} = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,80\sqrt{\bar{H}}} \quad (36)$$

$t_{c\text{Giandotti}}$ - tempo de concentração em horas;

A - área da bacia em km²;

L - comprimento do curso de água principal em km;

\bar{H} - altura média da bacia hidrográfica em metros;

Com as respetivas fórmulas é possível apresentar o tempo de concentração para as bacias hidrográficas da ribeira dos Socorridos e da ribeira do Vigário e a respetiva média.

Tabela 10 - Tempo de concentração nas bacias hidrográficas

	Fórmula	Tempo de concentração (t _c) (hr:mm)	Média (hr:mm)
Ribeira dos Socorridos	Témez	1:08	1:32
	Ven Te Chow	1:20	
	Giandotti	2:06	
Ribeira do Vigário	Témez	0:48	1:00
	Ven Te Chow	0:45	
	Giandotti	1:27	

3.5.6 Densidade de drenagem

A densidade de drenagem (D_d) traduz a relação entre o comprimento total dos cursos de água ($\sum L_i$) de uma bacia hidrográfica e área dessa mesma bacia (A).

As bacias com maior densidade de drenagem tendem a estar mais sujeitas a riscos de cheia, o que corresponde a uma bacia impermeável que pode ou não ter relevo acentuado. Por outro lado, as bacias com menos densidade de drenagem estão sujeitas a um menor risco de cheia o que se traduz numa bacia permeável que pode ou não ter um relevo menos acentuado.

$$D_{d\text{ Socorridos}} = \frac{\sum L_i}{A} = \frac{125,257}{38,74} = 3,23 \text{ km} / \text{ km}^2 \quad (37)$$

$$D_{d\text{ Vigário}} = \frac{\sum L_i}{A} = \frac{70,664}{15,42} = 4,58 \text{ km} / \text{ km}^2 \quad (38)$$

A densidade de drenagem geralmente varia entre 0,5 km/km² para bacias mal drenadas e 3,5 km/km² para bacias bem drenadas. Na bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos o valor da densidade de drenagem é 3,23 km/km², e para a bacia hidrográfica da ribeira do Vigário é de 4,58 km/km², então pode-se concluir que se trata de bacias hidrográficas

bem drenadas, ou seja, visto estas serem bacias com um relevo acentuado e impermeável existe um maior risco de cheia.

3.5.7 Percurso médio sobre o terreno

O percurso médio sobre o terreno (\overline{P}_L) é a distância média que água da chuva teria que percorrer, caso o escoamento se desse em linha reta, desde o ponto de queda na bacia hidrográfica até ao curso de água mais próximo. Este traduz-se na seguinte equação:

$$\overline{P}_{L \text{ Socorridos}} = \frac{1}{2 D_d} = \frac{1}{2 \times 3,23} = 0,1548 \text{ km} = 154,8 \text{ m} \quad (39)$$

$$\overline{P}_{L \text{ Vigário}} = \frac{1}{2 D_d} = \frac{1}{2 \times 4,58} = 0,1092 \text{ km} = 109,2 \text{ m} \quad (40)$$

3.5.8 Densidade hídrica

A densidade hídrica (D_h) relaciona o número de linhas de água existente na bacia hidrográfica (N) com a área total da bacia (A), ou seja, o número de cursos de água existentes por cada km^2 .

$$D_{h \text{ Socorridos}} = \frac{N}{A} = \frac{528}{38,74} = 13,63 \approx 14 \text{ cursos de água} / \text{km}^2 \quad (41)$$

$$D_{h \text{ Vigário}} = \frac{N}{A} = \frac{207}{15,42} = 13,42 \approx 14 \text{ cursos de água} / \text{km}^2 \quad (42)$$

3.6 Resumo das características das bacias hidrográficas

Tabela 11 - Resumo das características das bacias hidrográficas

Parâmetro	Ribeira dos Socorridos	Ribeira do Vigário
Área	38,74 km ²	15,42 km ²
Perímetro	37,50 km	19,91 km
Índice de compacidade de Gravelius (K_C)	1,70	1,43
Índice de alongamento (K_L)	6,95	4,19
Fator de forma (K_F)	0,12	0,27
Altitude média (Z_{med})	931,41 m	663,84 m
Altura média (h_{med})	931,41 m	663,84 m
Comprimento do curso de água principal (L)	17673,12 m	9415,21 m
Altitude máxima do curso de água principal	1475 m	1320 m
Declive médio do curso de água principal (i_{med})	0,083	0,140
Altura equivalente do curso de água principal (Z_{eq})	787,90	1049,13
Declive equivalente do curso de água principal (i_{eq})	0,045	0,111
Declive 10-85 (i_{10-85})	0,057	0,125
Índice de relevo (i_{relevo})	0,141	0,186
Declive médio da bacia	40,76°	24,97°
Declive médio da bacia	86,20 %	46,57 %
Hierarquização de Strahler	Ordem 5	Ordem 4
Número de curso de cursos de água	528	207
Comprimento total dos cursos de água	125,257 km	70,664 km
Hierarquização de Shreve	Magnitude 250	Magnitude 104
Relação de bifurcação média ($\overline{R_b}$)	1,56	1,87
Tempo de concentração (Témez)	1h08m	0h48m
Tempo de concentração (Ven Te Chow)	1h20m	0h45m
Tempo de concentração (Giandotti)	2h06m	1h27m
Tempo de concentração médio	1h32m	1h00m
Densidade de drenagem (D_d)	3,23 km/km ²	4,58 km/km ²
Percurso médio sobre o terreno ($\overline{P_L}$)	154,8 m	109,2 m
Densidade hídrica (D_h)	14 cursos de água/km ²	14 cursos de água/km ²

3.7 Precipitação anual média

A precipitação anual média é o valor médio de precipitação numa determinada bacia hidrográfica num conjunto muito grande de anos hidrológicos. Esta pode ser calculada de três formas, nomeadamente pelo método da média aritmética, método das isoietas ou pelo método de Thiessen. Para ambas as bacias hidrográficas foi utilizado o método das isoietas, visto que o mapa de isoietas já foi apresentado anteriormente na figura 23.

Para uma melhor visualização da aplicação deste método, é possível observar o seguinte exemplo, em que (P_i) e (P_{i+1}) corresponde ao valor da precipitação em duas isoietas e (A_i) a área entre essas isoietas e (A) a área total da bacia hidrográfica.

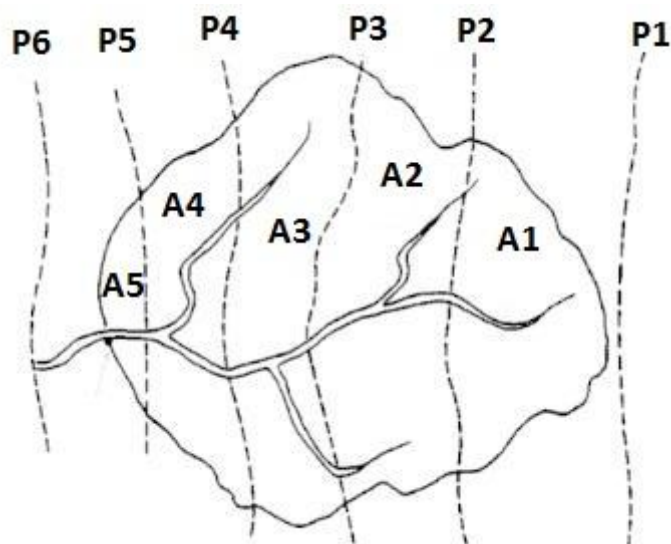


Figura 44 - Exemplo da aplicação do método das isoietas

Assim, a precipitação anual média obtém-se através da seguinte fórmula:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right)}{A} \quad (43)$$

Através da figura 23 e com recurso ao software *ArcGis* e às *shapefiles* disponibilizadas pelo Atlas do Ambiente Digital - Instituto do Ambiente de onde foram retirados os valores das áreas correspondentes a cada valor de precipitação, foi possível calcular a precipitação anual média para a bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos e do Vigário.

Tabela 12 - Área correspondente ao intervalo de isoietas para cada uma das bacias hidrográficas

Precipitação (mm)	Área Socorridos (km ²)	Área Vigário (km ²)
< 800	1,44	2,05
800 - 1000	0,68	2,18
1000 - 1200	1,26	1,99
1200 - 1400	0,99	2,02
1400 - 1600	2,69	1,31
1600 - 2000	17,59	5,87
2000 - 2400	7,75	-
2400 - 2800	4,51	-
> 2800	1,83	-
Total	38,74	15,42

Aplicando a equação (43), correspondente à precipitação anual média, obtemos:

Tabela 13 – Precipitação anual média nas bacias hidrográficas

	Precipitação anual média (mm)
Ribeira dos Socorridos	1912,05
Ribeira do Vigário	1345,20

3.8 Escoamento anual médio

O escoamento anual médio define-se como o valor médio do volume de água anual que atravessa a secção em estudo num conjunto muito grande de anos hidrológicos.

Com base nos dados recolhidos em Portela *et al.* (2002) e Prada *et al.* (2005), e atendendo ao facto que a principal lacuna do conhecimento no estudo dos escoamentos provém da insuficiência de informação hidrométrica, visto que o número de pontos de medição e a dimensão dos períodos são nitidamente insuficientes, foram obtidas as isolinhas anuais médias do escoamento total.

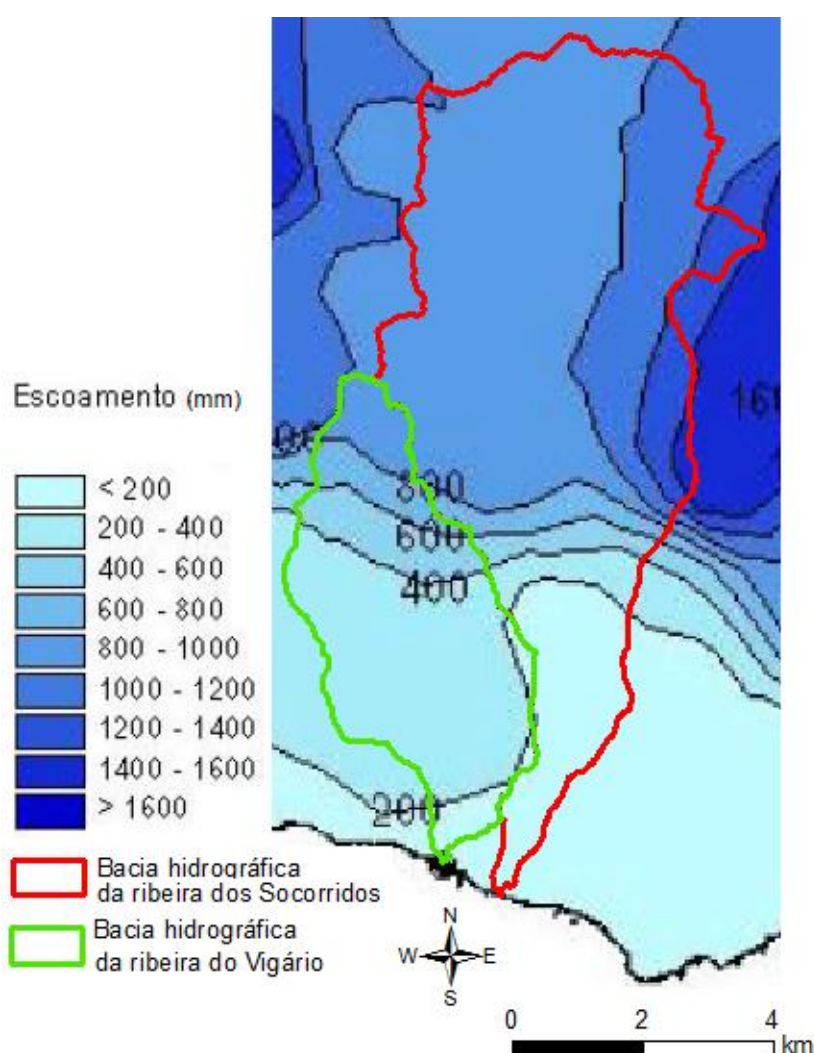


Figura 45 - Isolinhas de escoamento anual médio total

Estas isolinhas de escoamento anual médio e respetivos dados foram analisados e tratados através do método das isoietas e com recurso ao software informático de SIG, *ArcGis*, obtendo-se assim os valores do escoamento anual médio por área, e o valor médio do escoamento anual médio em cada uma das bacias hidrográficas.

Tabela 14 - Valores do escoamento anual médio por área

Escoamento (mm)	Área Socorridos (km ²)	Área Vigário (km ²)
< 200	5,07	1,12
200 - 400	1,31	9,59
400 - 600	1,04	2,08
600 - 800	1,46	1,32
800 - 1000	20,44	1,31
1000 - 1200	6,96	-
1200 - 1400	2,15	-
1400 - 1600	0,31	-
Total	38,74	15,42

Tabela 15 – Escoamento anual médio em ambas as bacias hidrográficas

	Escoamento anual médio (mm)
Ribeira dos Socorridos	819,67
Ribeira do Vigário	397,67

3.9 Caudal de ponta de cheia

O caudal de ponta de cheia para cada uma das bacias hidrográficas, será calculado através do método racional, onde serão apenas abordados caudais de natureza líquida, ou seja, só compostos por água, cuja fórmula é:

$$Q = \frac{C i A}{3,6} \quad (44)$$

O caudal de ponta de cheia (Q) é expresso em m³/s para um período de retorno T (anos), o coeficiente de escoamento (C) é um valor adimensional, a intensidade média da precipitação (i) é expressa em mm/h e o valor da área (A) utilizado é em km².

3.9.1 Coeficiente de escoamento C

O coeficiente de escoamento (C) tem essencialmente em conta as perdas de precipitação, incluindo, embora com diferentes importâncias relativas, as perdas por interceção, infiltração, retenção superficial e evapotranspiração, e a difusão do escoamento. Este coeficiente é também função do período de retorno, aumentando com o aumento do período de retorno, de modo a expressar a diminuição das perdas de precipitação. (Portela, *et. al.*, 2002)

Os valores considerados para a obtenção do coeficiente de escoamento (C) estão na tabela seguinte:

**Tabela 16 - Valores do coeficiente C da fórmula racional
(adotado de CHOW, *et. al.*, 1988)**

Tipo de ocupação			Período de retorno, T (anos)						
			2	5	10	25	50	100	500
Zona urbana									
Asfalto			0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Betão/telhados			0,75	0,80	0,88	0,88	0,92	0,97	1,00
Relvados	Ocupando menos de 50 % de área	Declive de 0 a 2%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
		Declive de 2 a 7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
		Declive superior a 7%	0,43	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
	Ocupando de 50 % a 75% de área	Declive de 0 a 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
		Declive de 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
		Declive superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
	Ocupando mais de 75 % de área	Declive de 0 a 2%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
		Declive de 2 a 7%	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
		Declive superior a 7%	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zona não urbana									
Terreno cultivado	Declive de 0 a 2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57	
	Declive de 2 a 7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60	
	Declive superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61	
Pastagem	Declive de 0 a 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53	
	Declive de 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58	
	Declive superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60	
Floresta	Declive de 0 a 2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48	
	Declive de 2 a 7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56	
	Declive superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58	

Grande parte da área de ambas as bacias hidrográficas é em zona não urbana de floresta, e como já foi analisado anteriormente o declive de ambas é superior a 7%. Assim considerando um período de retorno de 100 anos, o valor do coeficiente (C) a ser utilizado será de 0,52.

3.9.2 Intensidade *i*

A intensidade de precipitação (*i*) é um parâmetro necessário para aplicar a fórmula racional. Para tal, recorreu-se às curvas de intensidade/duração/frequência (IDF), preconizadas por Matos e Silva, (1986), considerando a duração de precipitação igual ao tempo de concentração (*t*), que corresponde à situação mais desfavorável. A intensidade de precipitação (*i*) obtém-se através da seguinte expressão:

$$i = at^b \quad (45)$$

Em que (*i*) representa a intensidade de precipitação em mm/h, (*t*) é a duração da precipitação e (*a*) e (*b*) são parâmetros adimensionais que dependem da região do país e do tempo de retorno (T) considerado. Na tabela 17 apresentam-se os valores destes parâmetros propostos por Matos e Silva, (1986).

Tabela 17 - Parâmetros, *a* e *b*, das curvas IDF de diferentes regiões

(Fonte: Matos e Silva, 1986)

Período de Retorno (T) (anos)		2	5	10	20	50	100
S. Catarina (Madeira)	a	193,12	228,83	248,70	265,72	285,72	299,45
	b	-0,517	-0,512	-0,508	-0,505	-0,502	-0,499

A região neste caso a considerar será a de Santa Catarina (Madeira), visto ser a mais próxima das bacias hidrográficas, e considerando um período de retorno (T) de 100 anos, os valores de (*a*) e (*b*) serão respetivamente 299,45 e -0,499.

O tempo de concentração (*t*) a considerar, será o tempo de concentração médio em minutos, presentes na tabela 10, de cada uma das bacias hidrográficas. Assim após obter os coeficientes adimensionais (*a*) e (*b*), e os tempos de concentração (*t*), já podemos calcular a intensidade de precipitação (*i*), recorrendo à equação (45).

- Ribeira dos Socorridos:

$$i_{Socorridos} = 299,45 \times 100^{-0,499} = 30,08 \text{ mm} / h \quad (46)$$

- Ribeira do Vigário:

$$i_{Vigário} = 299,45 \times 59^{-0,499} = 39,14 \text{ mm} / h \quad (47)$$

3.9.3 Aplicação do método racional

Após a recolha dos dados anteriores é possível calcular o caudal de ponta de cheia para cada uma das bacias hidrográficas, através da equação (44):

Tabela 18 - Caudal de ponta de cheia das bacias hidrográficas

	Caudal ponta de cheia (m ³ /s)
Ribeira dos Socorridos	168,32
Ribeira do Vigário	87,18

Capítulo 4:

Transporte sólido e medidas de correção torrencial

4.1 Introdução

O estudo do transporte sólido numa bacia hidrográfica é de difícil execução, porque geralmente não existem pontos nas ribeiras em que se possa medir o volume de sedimentos em movimento. A própria quantificação deste volume é de difícil medição.

O material sólido que converge à rede hidrográfica e que é transportado pelo escoamento fluvial inicia-se em processos sedimentológicos que atuam nas bacias hidrográficas e que dependem de vários mecanismos associados à ocorrência e ao escoamento de água.

Os comportamentos hidrológicos, a morfologia do terreno, os usos e ocupação dos solos, entre outros, correspondem à sequência e à sucessão temporal de mecanismos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, em que a água é o seu principal agente. Durante o processo erosivo, podemos distinguir as seguintes fases:

- meteorização das rochas superficiais;
- fragmentação do solo e das rochas superficiais;
- destacamento das partículas superficiais, pelos agentes erosivos, que inclui a remoção dos sedimentos produzidos por movimentos de massa, pela precipitação e escoamento;
- transporte dos sedimentos erodidos;
- deposição de sedimentos;
- consolidação de sedimentos.

Como principais origens do material sólido, é possível distinguir os seguintes tipos de erosão do espaço interfluvial:

- erosão distribuída provocada por escoamento distribuído em encostas e bacias de receção;
- erosão localizada resultante de escoamento concentrado que provoca sulcos, ravinas ou incisão de canais incipientes;
- mobilização de sedimentos provenientes de movimentos de vertente ou de massa por escoamento distribuído ou concentrado.

Estes sedimentos após erodidos e através do escoamento são transportados pelas encostas ou pela rede de drenagem, e podem ser classificados conforme a sua capacidade de transporte em:

- torrentes de erosão;
- torrentes de transporte, ou em equilíbrio;
- torrentes de deposição.

As torrentes de erosão dão-se quando a capacidade de transporte do escoamento é superior à alimentação, resultando num aprofundamento do leito, com uma forte erosão a montante. Já nas torrentes de deposição, o processo é o oposto, há uma deposição progressiva e generalizada de sedimentos no leito do curso de água e a criação de zonas de deposição a jusante.

O transporte de sedimentos é composto por várias etapas numa rede de drenagem, nomeadamente:

- alimentação de sedimentos à rede de drenagem;
- incorporação dos sedimentos afluentes, aos cursos de água, no fluxo de escoamento;
- destacamento de sedimentos do fundo e margens dos leitos;
- transporte de sedimentos;
- deposição de sedimentos.

No que toca ao transporte de sedimentos, onde a capacidade hidráulica de transporte é superior à alimentação de sedimentos, as consequências são mostradas pela existência de erosões generalizadas ou localizadas. Este tipo de erosões pode apresentar as seguintes características:

- incisão de leitos;
- inundações de terraços e depósitos aluvionares;
- desmoronamentos de margens e da base de encostas;
- erosões localizadas em obstáculos, nos leitos ou salientes nas margens.

Os processos sedimentológicos, que ocorrem nos cursos de água, incluem, como já foi referido, fases de erosão, transporte e deposição, e do seu balanço total, resulta a quantidade de material sedimentar, ou produção de sedimentos, no final da bacia

hidrográfica que corresponde à quantidade de sedimentos depositados ou lançados no meio recetor final, o oceano Atlântico.

4.2 Caracterização do transporte sólido

O transporte sólido em canais com fundo móvel, pode ser classificado, consoante a origem dos materiais, em:

- transporte do material do fundo, correspondente a materiais cuja granulometria se encontra presente no fundo;
- transporte do material de lavagem, correspondente a materiais de dimensões inferiores às dos materiais do fundo e de origem exterior ao leito do trecho em consideração.

Quando se dá o movimento do material sólido do fundo, há vários aumentos da velocidade do escoamento que fazem com que um volume crescente de partículas rolem e escorreguem umas sobre as outras. Segundo (Quintela, 1981), existem três modos de transporte sólido, que se apresentam pela ordem de dimensões típicas médias decrescentes dos grãos transportados:

- transporte sólido por arrastamento, em que as partículas rolam ou escorregam sobre o fundo;
- transporte sólido por saltação, em que as partículas se deslocam alternadamente por pequenos saltos ou por escorregamento e rolamento sobre o fundo;
- transporte sólido em suspensão, em que as partículas se deslocam no seio do escoamento, contactando esporadicamente com o fundo.

Para estes três tipos de transporte sólido é difícil estabelecer qualitativamente a distinção entre transporte sólido por arrastamento, saltação ou suspensão. Segundo Cardoso (1998), é usual considerar conjuntamente o caudal sólido por arrastamento e o caudal sólido por saltação. Assim os métodos de cálculo conhecidos figuram-se da seguinte forma:

- fórmulas de caudal sólido por arrastamento, que incluem as contribuições do arrastamento e saltação;

- fórmulas de caudal sólido em suspensão, que contabilizam as parcelas referentes aos materiais do fundo e de lavagem;
- fórmulas de caudal sólido total, que não distinguem o modo de transporte.

4.3 Medidas de correção torrencial em bacias hidrográficas

Quando uma bacia hidrográfica verifica uma intensa atividade erosiva, o que pode provocar alguma torrencialidade do regime fluvial, sobretudo dos afluentes dos setores a montante, devido ao declive das vertentes e pela ausência de cobertura vegetal, é necessário tentar minimizar as consequências desta mesma atividade erosiva e torrencial.

Devido à natureza geológica e geomorfológica particular da ilha da Madeira, a maior parte das áreas das bacias hidrográficas das ribeiras são potenciadoras de uma elevada produção de fluxos de materiais sólidos, que constituem a componente mais perigosa das aluviões que ocorrem na Ilha. Sendo assim, diminuir o volume total de material sólido deslocado é uma medida prioritária da gestão do risco e de proteção contra as consequências das aluviões.

A implementação de sistemas ou estruturas transversais de interceção e retenção temporária de material sólido é considerada uma medida prioritária para a proteção das zonas críticas expostas ao perigo. Os vários tipos de obras e intervenções que podem ser implementadas são descritos nos subcapítulos seguintes.

4.3.1 Barragens

As barragens são de uma forma geral estruturas edificadas com materiais resistentes à erosão, que ajudam na diminuição do fluxo de água e no aumento da deposição de material sólido.

A instalação de uma barragem altera o ambiente sedimentar e morfológico de um curso de água, levando a que na fase de projeto de uma obra de engenharia seja necessário o estudo do seu impacto ambiental e social. Para compreender a influência da barragem a nível sedimentar, é necessário observar os efeitos a montante e a jusante, nomeadamente durante e após uma cheia. A maior parte do transporte sedimentar dá-se

durante uma cheia, altura em que estão presentes maiores caudais, e conseqüentemente existe uma maior capacidade de transporte (Buono *et al.*, 1998).

Na construção de uma barragem resulta a criação de um reservatório a montante desta, que provoca a redução da velocidade de escoamento e conseqüente deposição de carga sólida, provocando também um processo de redução do transporte sólido para jusante (Coelho, 2008).

Como o transporte sólido total é proporcional à velocidade do escoamento, com a redução da velocidade reduz-se também a quantidade de sólido transportado, sendo que este fica depositado a montante da barragem. O volume morto da albufeira é composto por sedimentos de maiores dimensões que se acumulam logo à entrada desta, formando por vezes um delta, e por partículas de menores dimensões, que permanecem mais tempo em suspensão e que são depositadas mais a jusante, perto do paramento da barragem (Lencastre & Franco, 1992).

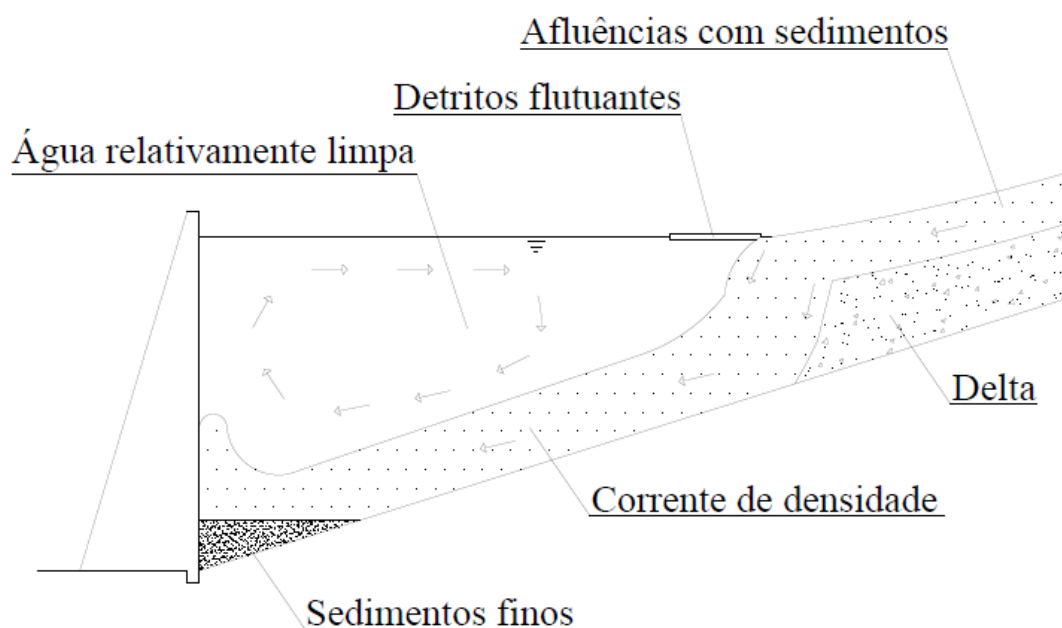


Figura 46 - Acumulação de sedimentos numa barragem

(Fonte: Lencastre e Franco, 1992)

4.3.2 Soleiras transversais

As soleiras transversais são vulgarmente conhecidas como travessões, e são particularmente adequadas para cursos de água de montanha. Estes têm como principal função controlar a erosão do fundo e das margens e evitar deposições generalizadas a jusante. (Cardoso, 1998).

As soleiras transversais, nos leitos dos cursos de água, são utilizadas para fixar as cotas do fundo do leito, reduzir a velocidade do escoamento, a capacidade de transporte e a erosão, além de conduzirem ao reequilíbrio fluvial. São aplicadas para promoverem a retenção de sedimentos, reduzir o transporte sólido no fundo, fixarem o declive de equilíbrio do talvegue e estabilizarem as margens.



Figura 47 - Soleira transversal na ribeira do Vigário

(Fonte: Autor)

4.3.3 Esporões

Os esporões fluviais são estruturas de regularização construídas transversalmente ao leito principal a partir de uma das margens, ocupando somente parte da largura da respetiva secção transversal. As principais finalidades destas estruturas são proporcionar a concentração do escoamento em secções bem definidas, estabilizar secções do escoamento de forma a minimizar a erosão geral do fundo e das margens (Cardoso, 1998).

Assim, os esporões defletem e orientam a veia do escoamento e protegem as margens da erosão. Estes podem ser encastrados diretamente nas margens ou numa proteção contínua de margem. Os esporões promovem, de acordo com a geometria adotada, a retenção de sedimentos, fixando o nível do leito na base das margens e defletindo o talvegue do curso de água para a zona central do leito.

Os esporões podem ser classificados como fechados ou abertos, em ambos os casos, podem ter cristas emersas ou submersas, total ou parcialmente, e perfis horizontais ou mergulhantes. Os esporões fechados são estruturas maciças com um núcleo que, por razões económicas, é construído, geralmente, com o material do fundo da linha de água, protegido por um revestimento. Os esporões abertos são estruturas que permitem que parte significativa do escoamento se dê por percolação, através deles, defletindo menos o escoamento do que os esporões fechados.

Imediatamente a jusante dos esporões, as linhas de corrente têm curvatura côncava relativamente à margem onde se situa o respetivo encontro, o que conduz ao movimento do material do fundo na direção dessa margem e ao consequente assoreamento local (Cardoso, 1998).



Figura 48 - Esporão em betão

(Fonte: Colombo *et al.*, 2002)

4.3.4 Açudes

Açudes são estruturas pesadas, construídas em betão, que de uma forma geral são abertas, com uma ou mais aberturas, ou em forma de grelha.

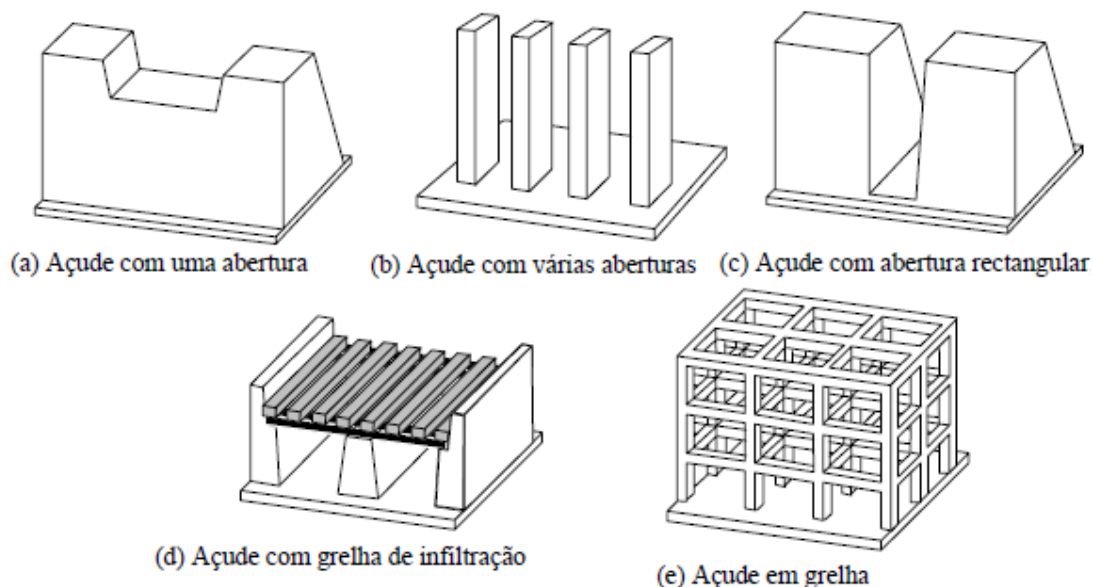


Figura 49 - Vários tipos de açudes

(Fonte: Adaptado de Lien, 2003)

Os açudes, podem ter vários formatos e configurações, dependendo das características do local a implementar. Mas todas elas têm uma função principal, deixar passar sedimentos de menores dimensões que não causem estragos e reter sedimentos de grandes dimensões que possam causar perigo às áreas a jusante do local onde estejam instalados. A eficácia destes açudes abertos na prevenção de aluviões foi provada em vários estudos feitos no Japão. Todos estes estudos chegaram à conclusão que alterando o espaçamento entre as aberturas do açude pode diminuir-se o efeito destruidor da aluvião, permitindo passar entre as aberturas os sedimentos de menores dimensões e retendo aqueles com um maior potencial destruidor (Lien, 2003).

Watanabe, et al. (1980) demonstrou que o espaçamento entre as aberturas do açude tem grande influência na sua capacidade de retenção. Este diz que quando o espaçamento $b/D_{m\acute{a}x} < 2.0$, onde b é o espaçamento entre aberturas do açude e $D_{m\acute{a}x}$ é o diâmetro máximo dos sedimentos, o volume da aluvião pode ser reduzido em pelo menos 50% durante o seu pico máximo, como demonstra a figura 50.

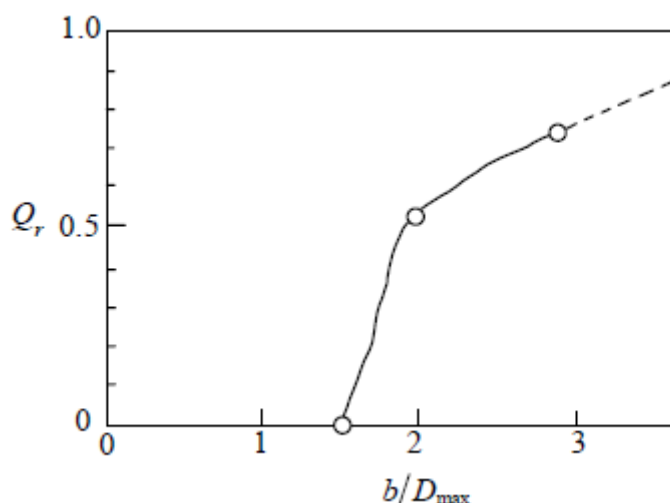


Figura 50 - Relação da taxa de diminuição de descarga de sedimentos, Q_r , e do espaçamento, $B / D_{máx}$, numa aluvião

(Fonte: Lien, 2003)

Lien (2003) refere que outros autores estudaram vários tipos de açudes e recomendam que o espaço entre as aberturas dos açudes deve ser $b/D_{máx} < 1.5 \sim 2.0$. Todos eles concordam na eficácia deste tipo de açudes na prevenção de aluviões, e reiteram que o espaçamento entre as aberturas dos açudes é um dos principais fatores para um eficaz controlo do transporte de sedimentos.

Este tipo de estruturas foi edificado recentemente no concelho do Funchal, nomeadamente na ribeira de São João, na ribeira de Santa Luzia e na ribeira de João Gomes. Foram construídas um total de 12 açudes abertos, com o objetivo de reter o material sólido de grandes dimensões e impedir que este chegue à foz e à baixa da cidade, como já aconteceu anteriormente, nomeadamente a 20 de fevereiro de 2010.



Figura 51 - Açude localizado na ribeira de Santa Luzia (Funchal)

(Fonte: Jornal da Madeira)

4.3.5 Revestimento do fundo e das margens

O revestimento do fundo e das margens, ou a canalização de uma ribeira, tem como objetivo a proteção das margens e do fundo, de forma a protegê-las da erosão e da infraescavação. Este revestimento normalmente feito em betão, permite um aumento da vazão, de forma a garantir o transporte de sedimentos, evitando o assoreamento de material sólido em locais indesejados.



Figura 52 - Revestimento do fundo e das margens da ribeira do Vigário

(Fonte: Autor)

Esta medida é recomendada em bacias hidrográficas sujeitas a uma forte erosão, principalmente em zonas urbanas e em locais de grande fluxo torrencial. Esta solução também permite uma maior consistência dos taludes que ladeiam as ribeiras, mas por outro lado implica um forte impacto ambiental e visual.

Capítulo 5:

Conclusões

5.1 Conclusões

Nas últimas duas décadas, veio a registar-se um grande investimento ao nível da caracterização das bacias hidrográficas da ilha da Madeira e da contabilização do transporte sólido, contribuindo para o desenvolvimento local e regional, a nível de infraestruturas hidráulicas fluviais, dispositivos de contabilização e introdução de medidas mitigadoras. Isto, com o objetivo de evitar ou minimizar situações de catástrofe natural (aluviões) e salvaguardar o bem-estar da população da ilha da Madeira.

A presente dissertação focaliza-se no estudo da caracterização das bacias hidrográficas da ribeira dos Socorridos e do Vigário, da ilha da Madeira e da contabilização do transporte sólido das mesmas. No que se relaciona com a caracterização das bacias hidrográficas pretendeu-se avaliar as características morfométricas das bacias hidrográficas da ribeira dos Socorridos e do Vigário. Para a realização da caracterização morfométrica destas bacias foram necessárias as delimitações das áreas, dos perímetros e dos comprimentos axiais das mesmas com o auxílio do software *ArcGis*; com a ajuda do qual foram caracterizados todos os índices/parâmetros descritivos de uma bacia hidrográfica. Estes índices/parâmetros atrelados ao clima da região, explicam a necessidade ou não da intervenção humana com a construção de infraestruturas hidráulicas fluviais e implementação de medidas de mitigação.

No que se relaciona com o transporte sólido, sendo este um processo natural, complexo e interdependente, que é cada vez mais afetado por impactos antropogénicos, conduzindo frequentemente à necessidade de efetuar intervenções de manutenção nas infraestruturas hidráulicas fluviais.

Sendo esta uma temática de extrema importância para a ilha da Madeira, existe toda e mais alguma necessidade de caracterização dos processos que envolve, sendo a mesma alvo de desenvolvimento de alguns trabalhos de investigação. Isto, pelo fato, da natureza geológica e geomorfológica particular da ilha da Madeira, e a maior parte das áreas das bacias hidrográficas das ribeiras serem potenciadoras de uma elevada produção de fluxos de materiais sólidos, que constituem a componente mais perigosa das aluviões que ocorrem na Ilha. Sendo assim, existe a necessidade de diminuir o volume total de material sólido deslocado, sendo esta uma medida prioritária da gestão do risco e de proteção contra as consequências das aluviões.

Logo, tem sido sempre objetivo desses estudos relativos ao transporte sólido, a caracterização de forma integrada dos processos envolvidos, permitindo assim estabelecer termos de comparação e calibração, bem como a implementação de sistemas ou estruturas transversais de interceção e retenção temporária de material sólido. Esta é considerada uma medida prioritária para a proteção das zonas críticas expostas ao perigo.

Salienta-se ainda a dificuldade sentida na obtenção de dados que permitissem fazer a caracterização das bacias hidrográficas da ribeira dos Socorridos e do Vigário, da ilha da Madeira e da contabilização do transporte sólido das mesmas. Em relação à contabilização do transporte sólido, não foi de todo possível obter perante nenhuma entidade, dados ou contabilizações específicas.

5.2 Considerações finais e desenvolvimentos futuros

Com a realização desta dissertação, foram cumpridos os objetivos a que o investigador se propôs, contudo existe sempre algo a melhorar e daí fica o registo para trabalhos futuros a serem desenvolvidos por colegas da especialidade.

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação poderá ser um pressuposto para a criação de uma metodologia de abordagem na caracterização das bacias hidrográficas e na contabilização do transporte sólido, tudo isto de forma informatizada utilizando o software *ArcGis*. Podendo esta vir a revelar-se uma mais-valia, quer para a valorização do trabalho desenvolvido, quer como base para possíveis novas intervenções ou melhoramentos a introduzir na referida metodologia de abordagem num futuro próximo.

No relativo à contabilização do transporte sólido das bacias hidrográficas da ribeira dos Socorridos e do Vigário, da ilha da Madeira, sabendo que este resulta dos sedimentos transportados nas principais linhas de água, provenientes essencialmente da erosão laminar nas encostas das referidas bacias hidrográficas e da erosão localizada ao longo dos próprios canais de escoamento. Então as características do escoamento e do canal, são, juntamente com as características dos sedimentos os principais fatores que determinam o transporte sólido relativo as principais linhas de água, das referidas bacias hidrográficas.

Sabendo que o transporte sólido poderá ocorrer de duas formas, por arrastamento (os sedimentos movem-se junto ao fundo das principais linhas de água), ou, por suspensão (os sedimentos deslocam-se no seio da água, a uma certa distância do fundo das principais linhas de água).

A contabilização do transporte sólido das bacias hidrográficas, logo a determinação do caudal sólido que passa em determinada secção de uma linha de água da referida bacia hidrográfica, poderá ser executada de uma das seguintes formas:

- obtenção de relações teóricas envolvendo sempre, em maior ou menor grau, a simplificação do fenómeno;
- experimentação laboratorial que conduza ao relacionamento das observações do caudal sólido com as características hidráulicas do escoamento;
- medições de campo visando, também, a obtenção de relações empíricas entre caudal sólido e as características hidráulicas do escoamento.

Esta última, é a que tem conduzido a resultados mais realistas e fidedignos, para das principais linhas de água em que se processam as medições. O objetivo de um programa de recolha de amostras numa linha de água, é portanto, conseguir um número suficiente de dados de transporte sólido por arrastamento e em suspensão, de modo a definir o volume total de sedimentos transportados e identificar as correlações existentes entre os caudais líquido e sólido em diferentes circunstâncias, relativos a diferentes secções de uma linha de água de referida bacia hidrográfica.

Contudo, este processo apresenta muitas dificuldades, nomeadamente na obtenção de amostras e elevado custo associado às medições em campo, constituindo o anteriormente descrito uma das principais razões pelas quais esta via tem sido pouco explorada.

Independentemente das dificuldades e dos atrasos verificados, no melhoramento no processo de caracterização das bacias hidrográficas da ilha da Madeira e da contabilização do transporte sólido, este será a base de suporte à gestão, à proteção e à valorização ambiental, social e económica, visando a minimização de episódios que num passado próximo se revelaram fatídicos para as populações (aluviões).

Referências Bibliográficas

Referências bibliográficas

- Abreu, U. (2007). Riscos Naturais no Ordenamento do Território: Aplicação ao Município de Câmara de Lobos - Construção de um sistema de gestão ambiental em ambiente de SIG's. Universidade de Coimbra.
- Abreu, U., Tavares, A., & Rodrigues, D. (2009). Processos de perigosidade natural no Município de Câmara de Lobos - Madeira. Contributo para a gestão do Risco e da emergência. Revista Territorium 01/2009.
- APA. (2007). Atlas do Ambiente. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.
- Bouno, S., Shimizu, Y., & Saitou, D. (1998). Sediment transport in the Saru River and Nibutani Dam. Proceedins of the 7th International Symposium on River. Hong Kong.
- Brum da Silveira, A., Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., Prada, S., & Rodrigues, C. (2008). A new Geological Map of Madeira Island, Portugal. IAVCEI General Assembly. Reykjavík.
- Cardoso, A. H. (1998). Hidráulica Fluvial. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Carta de solos da ilha da Madeira à escala 1:50000. (1992). Secretaria Regional da Economia, Direção Regional da Agricultura. 1ª Edição.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). Applied Hydrology. Singapura: McGraw-Hill International Student Edition.
- Coelho, A. N. (2008). Geomorfologia Fluvial de Rios Impactados por Barragens, Caminhos de Geografia (revista on-line), vol. 9, n.º 26. Obtido em Setembro de 2014,
<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15721/8895>
- Colombo, A., Hervás, J., & Arellano, A. (2002). Guidelines on Flash Flood Prevention and Mitigation. Ispra, Itália: EUR Report 20386 EN, European Commission, DG Joint Research.
- Estudo de Avaliação do risco de aluviões na ilha da Madeira. (Outubro de 2010). Laboratório Regional de Engenharia Civil, Universidade da Madeira; Instituto Superior Técnico.

- Ferreira, H. (1955). O Clima de Portugal, VIII: Açores e Madeira. Lisboa: INMG.
- Georisco. Análise, Gestão e Operacionalização do Risco. (2011). Relatório Compósito do Plano Director Municipal de Câmara de Lobos. Departamento de Gestão e Ordenamento do Território do Município de Câmara de Lobos.
- Lencastre, A., & Franco, F. (1992). Lições de Hidrologia. Universidade Nova de Lisboa.
- Lien, H. P. (2003). Design of slit dams of controlling stony debris flows. International Journal of Sediment Research, Vol 18, No. 1, 74-87.
- Lousada, S. A. (2012-2013). Apontamentos da Unidade Curricular de Obras Marítimas do Mestrado em Engenharia Civil. Madeira: Universidade da Madeira, 2012-2013.
- Lousada, S. A. (2012-2013). Hidrologia, Recursos Hídricos e Ambiente, Universidade da Madeira, 118 pp. Texto de apoio à disciplina de “Hidrologia, Recursos Hídricos e Ambiente” do 1º ciclo da Licenciatura em Engenharia Civil. Universidade da Madeira.
- Lousada, S. A. (2012-2013). Obras Marítimas e Fluviais, Universidade da Madeira, 593 pp. Texto de apoio à disciplina de “Obras Marítimas e Fluviais” do 2º ciclo do Mestrado de Engenharia Civil. Universidade da Madeira.
- Madeira, J., Brum da Silveira, A., Ramalho, R., Fonseca, P., & Prada, S. (2007). Carta Geológica da ilha da Madeira, na escala 1:50.000, Relatório Técnico. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira.
- Matos, M., & Silva, M. (1986). Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial. Curvas intensidade-duração-frequência da precipitação em Portugal. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- PGRH10. (2013). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Arquipélago da Madeira. Direção Regional do Ordenamento do Território e Ambiente, Secretaria Regional do Ambiente e dos Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira.
- Portela, M. M., Gaspar, M. A., & Hora, G. (2002). Avaliação do escoamento anual médio na ilha da Madeira. Tecnologia da Água.
- Prada, S. (2000). Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da ilha da Madeira. Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Universidade da Madeira.

- Prada, S., Perestrelo, A., Sequeira, M., Nunes, A., Figueira, C., & Cruz, J. (2005). Disponibilidades Hídricas da ilha da Madeira. AQUAMAC - Técnicas y métodos para la gestion sostenible del agua en la Macaronesia. Instituto Tecnológico de Canarias, Cabildo de Lanzarote e Consejo Insular de Aguas de Lanzarote.
- PRAM. (2003). Plano Regional da Água da Madeira, Relatório Técnico. Secretaria Regional do Ambiente e dos Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira.
- Quintela, A. C. (1981). Hidráulica. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Santos, D., & Aguiar, D. (2006). Impactos e Medidas de Adaptação às Alterações Climáticas no Arquipélago da Madeira - Projeto CLIMAAT II. Direção Regional do Ambiente.
- Santos, F., & Miranda, P. (2006). Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projeto SIAM II. Lisboa: Gradiva.
- Santos, F., Forbes, K., & Moita, R. (2002). Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Project. Lisboa: Gradiva.
- Watanabe, M., Mizuyama, T., & Uehara, S. (1980). Review of debris flow countermeasure facilities. J. of the Japan Erosion Control Engineering Society, Vol. 115, pp. 40-45.
- Zbyszewski, G., Ferreira, O., Medeiros, A., Aires-Barros, L., Silva, L., Munhá, J., et al. (1975). Notícia explicativa das folhas A e B (ilha da Madeira) da carta geológica de Portugal: 1/50 000. Serviços Geológicos de Portugal.
- Zêzere, J. L. (2005). Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente, Relatório nº41.

Anexos

Anexo 1

The image shows two screenshots of the ArcGIS Table tool. The top screenshot displays the 'Polig_SOC' table with one record. The bottom screenshot displays the 'Poligono_VIG' table with one record. Both tables include columns for OBJECTID, Shape, Id, gridcode, Area (km^2), and Perimetro (km).

OBJECTID *	Shape *	Id	gridcode	Area (km^2)	Perimetro (km)
1	Polygon	1	0	38,73847	37,50397

OBJECTID *	Shape *	Id	gridcode	Area (km^2)	Perimetro (km)
1	Polygon	1	0	15,41903	19,907953

Figura 53 - Área e Perímetro obtido através do software ArcGis

Anexo 2

Tabela 19 - Dados relativos à bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

Altitude (m)	Área (m ²)	Área (km ²)	Acumulado Área (km ²)	% Acumulado	Área entre curvas %
1860	0	0	0	0	0
1800	29800	0,030	0,030	0,077	0,077
1700	425825	0,426	0,456	1,176	1,099
1600	1022975	1,023	1,479	3,817	2,641
1500	1650725	1,651	3,129	8,078	4,261
1400	2475475	2,475	5,605	14,468	6,390
1300	2648800	2,649	8,254	21,306	6,838
1200	2910825	2,911	11,164	28,820	7,514
1100	2991875	2,992	14,156	36,543	7,723
1000	3025025	3,025	17,181	44,352	7,809
900	3412375	3,412	20,594	53,161	8,809
800	3303225	3,303	23,897	61,688	8,527
700	3258600	3,259	27,156	70,100	8,412
600	2975925	2,976	30,131	77,782	7,682
500	2345925	2,346	32,477	83,837	6,056
400	2063475	2,063	34,541	89,164	5,327
300	1460125	1,460	36,001	92,933	3,769
200	1101500	1,102	37,102	95,777	2,843
100	996400	0,996	38,099	98,349	2,572
0	639650	0,640	38,739	100,000	1,651

Tabela 20 - Dados relativos à bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

Altitude (m)	Área (m²)	Área (km²)	Acumulado	% Acumulado	Área entre curvas %
1410	0	0	0	0	0
1400	6375	0,006	0,006	0,041	0,041
1300	222700	0,223	0,229	1,486	1,444
1200	408800	0,409	0,638	4,137	2,651
1100	648425	0,648	1,286	8,342	4,205
1000	1022900	1,023	2,309	14,976	6,634
900	1310675	1,311	3,620	23,476	8,500
800	1560525	1,561	5,180	33,596	10,120
700	1954200	1,954	7,135	46,270	12,674
600	1791200	1,791	8,926	57,886	11,616
500	1607075	1,607	10,533	68,309	10,422
400	1514500	1,515	12,047	78,131	9,822
300	1216850	1,217	13,264	86,022	7,892
200	1047950	1,048	14,312	92,819	6,796
100	855225	0,855	15,167	98,365	5,546
0	252100	0,252	15,420	100	1,635

Anexo 3

Tabela 21 - Distância entre cotas no curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos

Distancia (m)	Altitude (m)
0	0
1920,045	50
3455,041	100
4887,226	150
6413,849	200
7596,091	250
8779,321	300
9638,943	350
10740,217	400
11583,217	450
12264,069	500
12825,284	550
13481,827	600
14067,181	650
14659,850	700
15032,306	750
15475,831	800
15784,138	850
16018,569	900
16263,118	950
16413,136	1000
16583,555	1050
16758,611	1100
16956,092	1150
17126,701	1200
17291,230	1250
17373,682	1300
17473,858	1350
17569,970	1400
17650,866	1450
17672,128	1475

Tabela 22 - Distância entre cotas no curso de água principal da bacia hidrográfica da ribeira do Vigário

Distância (m)	Altitude (m)
0	0
722,051	50
1197,486	100
1737,361	150
2442,991	200
2975,906	250
3298,969	300
3808,435	350
4014,311	400
4464,051	450
4957,507	500
5322,926	550
5389,086	600
5713,008	650
6165,633	700
6659,452	750
7061,944	800
7382,478	850
7681,786	900
7962,538	950
8228,016	1000
8490,379	1050
8702,467	1100
8844,193	1150
8980,342	1200
9140,735	1250
9366,053	1300
9415,205	1320

