

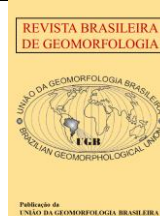


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, n° 3 (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2307>



Artigo de Pesquisa

A Influência do Coeficiente de Rugosidade nos Fenômenos de Cheias – Bacia Hidrográfica da Ribeira de Machico, Ilha da Madeira, Portugal

The Influence of the Roughness Coefficient on Flood Phenomena – Machico's Watershed, Madeira Island, Portugal

Sérgio António Neves Lousada ^{1,2,3,4,5}

- ¹ Universidade da Madeira, Departamento de Engenharia Civil e Geologia, Funchal, Portugal. slousada@staff.uma.pt.
- ² CITUR - Madeira – Centro de Investigação, Desenvolvimento e Inovação em Turismo, 9000-082 Funchal, Madeira, Portugal. turismo@mail.uma.pt
- ³ VALORIZA – Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos, Instituto Politécnico de Portalegre (IPP), 7300 Portalegre, Portugal. valoriza@ippportalegre.pt
- ⁴ Grupo de Investigação em Ambiente e Ordenamento do Território (MAOT), Universidade da Extremadura, 06071 Badajoz, Espanha.
- ⁵ RISCO – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal. decivil-risco@ua.pt
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8429-2164>

Recebido: 18/10/2022; Aceito: 16/01/2023; Publicado: 05/09/2023

Resumo: Acentuados pelas alterações climáticas regionais e globais, os fenómenos das cheias são eventos cada vez mais recorrentes e devastadores. Casos extremos como os que ocorreram em 2010 e 2013 na Ilha da Madeira corroboram com este indicativo, sendo as regiões mais afetadas as que possuíam maior índice urbanístico e maior impermeabilização do solo, como o concelho de Machico. Portanto, com base no histórico recente de cheias no concelho de Machico e o auxílio de ferramentas de georreferenciação como o ArcGIS, procedeu-se à análise geomorfológica e hidrológica da bacia hidrográfica da ribeira de Machico, de forma a verificar o caudal expectável para um período de recorrência de 100 anos, de acordo com a distribuição probabilística de Gumbel. Posteriormente analisou-se a capacidade de escoamento da foz por meio da equação de *Manning-Strickler*, onde será avaliado o coeficiente de rugosidade mínimo necessário para permitir o escoamento do caudal de ponta de cheia expectável. Por fim, os resultados sugerem que a foz não possui a capacidade de escoar o caudal precipitado, necessitando de alterações no coeficiente de rugosidade do leito.

Palavras-chave: Análise de cheias; Coeficiente de rugosidade; Hidráulica Urbana; Mitigação dos impactos urbanos; Planeamento urbano.

Abstract: Flood phenomena, intensified by regional and global climate change, are increasingly recurrent and devastating events. Extreme cases such as those in 2010 and 2013 on the island of Madeira corroborate this indicator. The regions most affected are those with the highest urban index and the most significant soil waterproofing, such as Machico. Therefore, based on the recent history of floods in the city of Machico and the aid of georeferencing tools such as ArcGIS, the geomorphological and hydrological analysis of the hydrographic basin of the Machico stream was carried out in order to verify the expected flow rate for a recurrence period of 100 years, through the Gumbel Probabilistic Distribution. Subsequently, the river mouth's flow capacity was analyzed using the Manning-Strickler equation, where the minimum roughness coefficient necessary to allow the flow of the expected high peak flow will be evaluated. Finally, the results suggest that the river's mouth does not have the capacity to drain the precipitated flow, requiring changes in the bed roughness coefficient.

Keywords: Flood analysis; Roughness Coefficient; Urban Hydraulics; Mitigation of urban impacts; Urban planning.

1. Introdução

Arelado ao desenvolvimento económico e tecnológico pós-revolução industrial, o planeta tem sofrido constantemente com as ações antrópicas, permitindo com que os fenómenos climáticos extremos se tornem uma das principais problemáticas enfrentadas pela humanidade, onde as cheias são os eventos com maior recorrência em regiões com elevado índice urbanístico (TUCCI, 1993; FRANCO; FILL, 2004; BARICHIVICH et al., 2018; GONÇALVES; LOUSADA, 2020). Segundo Gonçalves et al. (2020a), “o convívio com os eventos de cheias tem se tornado ao longo do tempo cada vez mais frequentes e intoleráveis, trazendo constantes riscos de perdas humanas e prejuízos económicos”.

Conforme abordado anteriormente, as cheias tendem a ser mais severas em zonas urbanas, uma vez que este fenómeno ocorre durante precipitações com elevada intensidade e onde a taxa de infiltração do solo é insuficiente para absorver todo o volume de água precipitado, propiciando assim o escoamento superficial (HOUGH, 1998; SILVA; SANTIAGO, 2007; LUNA et al., 2011; LOUSADA; GONÇALVES; VELARDE, 2020). Horton (1933) e Chow (1988) corroboram ao afirmarem que “[...] negligenciando a intercetação pela vegetação, o escoamento superficial é a parte da precipitação que não é absorvida pelo solo através da infiltração”. Nota-se que essa não absorção da precipitação por parte do solo pode ocorrer tanto pelo processo de saturação quanto pela impermeabilização do terreno (CHOW, 1988). Além disso, mediante o desenvolvimento urbano em zonas que previamente eram planícies de inundação, observa-se o aumento da magnitude das consequências negativas das inundações em uma região (CAMPANA; TUCCI, 1994).

Para Bryant (2005), Vieira et al. (2016) e Lousada, Gonçalves e Velarde (2020), as cheias também podem ocorrer quando a capacidade dos sistemas de drenagem urbana é insuficiente para escoar o caudal excedente à capacidade de absorção do solo, de forma a ocupar as ruas, comércio e indústrias. Nota-se que as áreas montanhosas estão mais sujeitas à ocorrência de cheias, pois os declives acentuados permitem uma maior energia gravitacional e, consequentemente, uma maior força destrutiva para os caudais escoados (BRYANT, 2005; GONÇALVES; LOUSADA; LIS, 2020b). Portanto, ilhas vulcânicas de grande altitude como Hawaii, Gran Canaria, Reunion e Madeira possuem características geomorfológicas que as tornam mais suscetíveis às cheias (LYMAN; SCHROEDER; BARNES, 2005; VIEIRA et al., 2016; GONÇALVES; LOUSADA; LIS, 2020b).

Inicialmente “[...] o único princípio a orientar a drenagem urbana era o conceito convencional do rápido afastamento da causa dos problemas, ou seja, afastar o caudal excedente de sua origem (Gonçalves et al., 2020a)”. Para Tucci, Porto e Barros (1995), esse princípio de rápido afastamento do problema, mesmo que eficiente para as regiões a montante, faz com que as inundações se intensifiquem nas áreas a jusante. Neste sentido, há apenas a transferência do problema de uma região para a outra, sem de facto solucionar a problemática em sua origem que está vinculada às ações antrópicas e geomorfológicas da bacia hidrográfica. Evidencia-se, portanto, que há a necessidade de empregar práticas com a maior capacidade de mitigação dos efeitos das cheias – i.e. estabelecer procedimentos efetivos na raiz da problemática, sem transferir os efeitos destrutivos de uma região para outra.

Neste sentido, objetiva-se efetuar a análise hidrológica da região, de forma verificar o caudal de ponta de cheia expectável para um tempo de recorrência de 100 anos e, posteriormente, comparar com a capacidade de escoamento da foz da bacia hidrográfica da ribeira de Machico. Caso as características da foz não sejam suficientes para o escoamento do caudal de ponta de cheia estimado, será calculado o coeficiente de rugosidade mínimo do leito para que atenda à solicitação hidrológica.

2. Área de Estudo

A área escolhida para o estudo foi a bacia hidrográfica da ribeira de Machico, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira, localizada no Oceano Atlântico entre as latitudes 30° 01' N e 33° 31' N e longitudes 15° 51' W e 17° 30' W (PRADA et al., 2005; FERNANDES, 2009). A bacia hidrográfica em questão faz parte de um aglomerado de bacias que compõem o concelho, sendo esta, com maior dimensão e de maior importância.

Tal como o Funchal, principal concelho da ilha, a bacia hidrográfica de Machico sofre com graves problemas de inundações, conforme observado em 2010 e 2013, quando a região foi impactada com perdas gigantescas, tanto no aspeto material quanto no aspeto humano. Por situar-se em uma zona consideravelmente urbanizada, a bacia hidrográfica da ribeira de Machico apresenta um significativo índice de impermeabilização do solo proveniente das edificações e pavimentações presentes (GONÇALVES et al., 2020b). Além disso, a foz da bacia hidrográfica da

ribeira de Machico possui uma densa vegetação florestal ou arbórea, o que reduz significativamente a capacidade de escoamento do canal (Figura 1).



Figura 1. Ribeira da bacia hidrográfica de Machico. Fonte: Autor (2023).

A caracterização da bacia hidrográfica foi efetuada através do software de sistema de informação geográfica ArcGIS 10.3, elaborado pela ESRI (Figura 2). Para tal, foi utilizado o ficheiro MDE fornecido pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), com resolução de 5 m e referência espacial “Madeira 1936 UTM Zona 28N”.

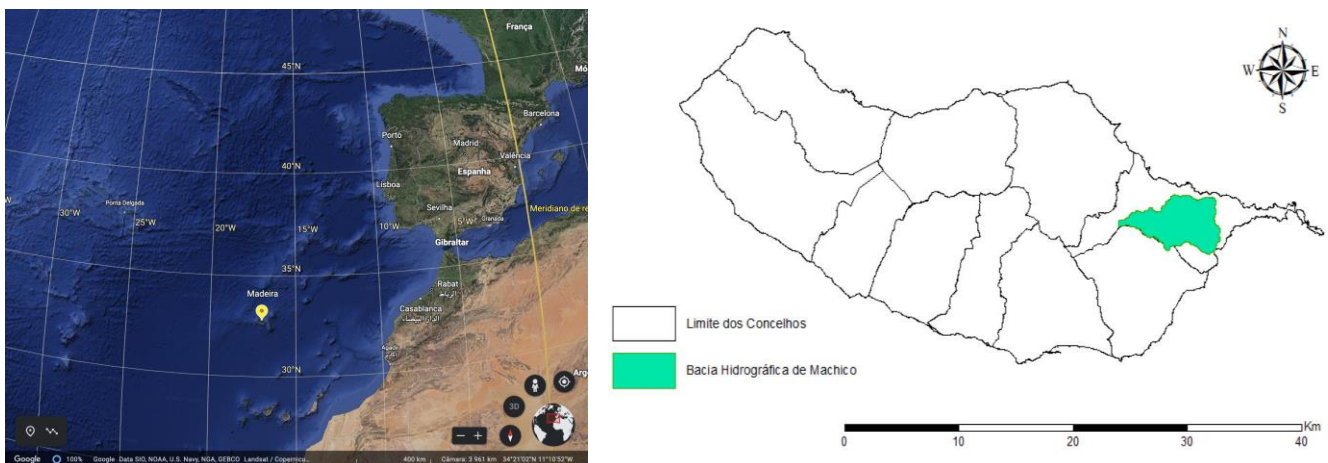


Figura 2. Localização da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira. Fonte: Autor (2023) – ArcGIS / ESRI.

Após a definição dos limites da bacia, procedeu-se a determinação dos parâmetros quantitativos (Tabela 1), bem como se retrata através da utilização do software de sistema de informação geográfica ArcGIS 10.3, elaborado pela ESRI a elaboração de mapa do relevo com incorporação dos cursos de água (Figura 3) e mapa de declividade (Figura 4).

Tabela 1. Geomorfologia da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico.

Características da Bacia Hidrográfica		
Área	km ²	24,649
Perímetro	km	34,700
Comprimento do Curso de Água Principal	km	12,071
Altura Máxima do Curso de Água Principal	m	984,999
Altura Mínima do Curso de Água Principal	m	0,000
Altura Média da Bacia Hidrográfica	m	406,385
Declive Médio do Curso de Água Principal	m/m	0,082

Fonte: Autor (2023) – ArcGIS / ESRI.

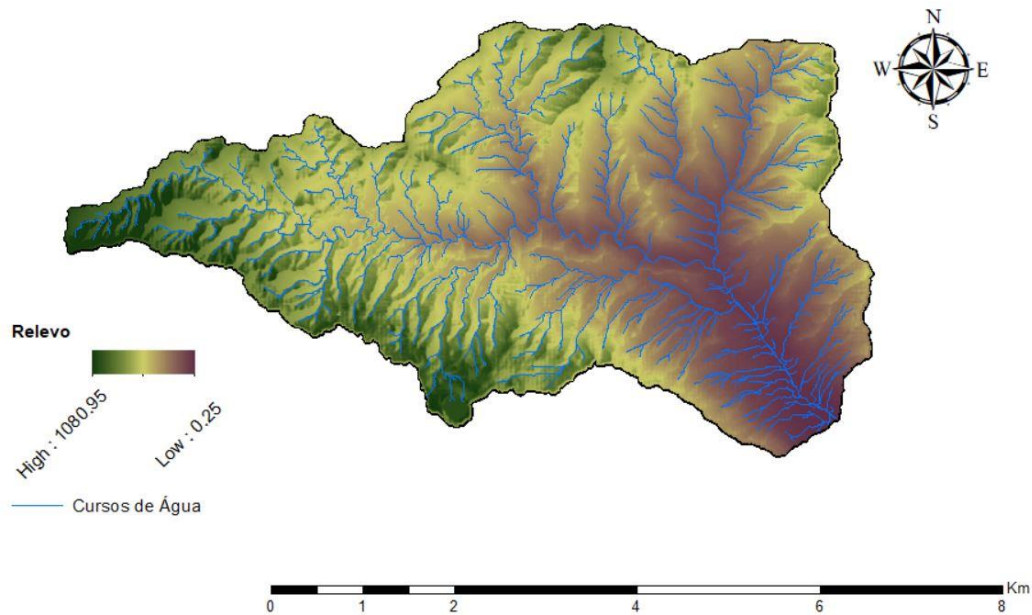


Figura 3 Mapa do relevo com incorporação dos cursos de água da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira. Fonte: Autor (2023) – ArcGIS / ESRI.

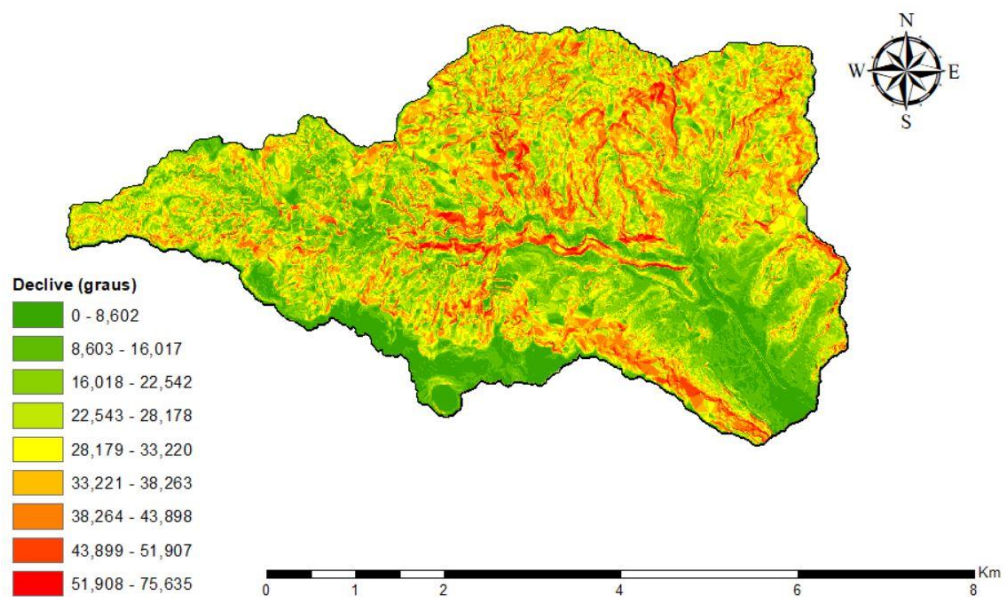


Figura 4 Mapa de declive em graus da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira. Fonte: Autor (2023) – ArcGIS / ESRI.

3. Materiais e Métodos

3.1. Avaliação da Necessidade de Alteração do Coeficiente de Rugosidade

A avaliação da necessidade de intervenção no coeficiente de rugosidade pode ser feita ao verificar a capacidade de escoamento da zona crítica de escoamento da ribeira (GONÇALVES et al., 2020a). A zona crítica é caracterizada pela redução (natural ou artificial) da seção de escoamento que tende a reter a água precipitada, aumentando o seu nível até ao transbordo da ribeira (VIEIRA et al., 2016). Neste sentido, procede-se ao cálculo do parâmetro *Fill Rate*, Eq. (1), tratando-se da razão entre o caudal de ponta de cheia estimado com a capacidade de escoamento da zona crítica em estudo.

$$FR = \frac{Q_P}{Q_M} \times 100 \quad (1)$$

Onde: FR = *Fill Rate*, em %; Q_P = Caudal de ponta de cheia expectável, em m³/s; Q_M = Capacidade de escoamento da foz, em m³/s.

Deste modo, Porto et al. (1993) sugere que as medidas de mitigação de impactos devem estabelecer um *Fill Rate* inferior à 85%, como forma de garantir pelo menos 15% de margem de segurança, garantindo resultados satisfatórios mesmo com erros leves na georreferenciação ou devido às mudanças urbanísticas a curto e médio prazo.

A capacidade de escoamento da zona crítica em análise pode ser determinada através da equação Manning-Strickler, Eq. (2), amplamente utilizada para o dimensionamento e análise de canais de escoamento livre (CHOW, 1988; LOUSADA; CAMACHO, 2018; LOUSADA; GONÇALVES; VELARDE, 2020; GONÇALVES et al., 2020a).

$$Q_M = \frac{1}{n} \times A \times R_H^{0,667} \times i^{0,5} \quad (2)$$

Onde: Q_M = Capacidade de escoamento da foz, em m³/s; n = Coeficiente de rugosidade, em m^{-1/3}.s; A = Área da secção transversal da foz, em m²; R_H = Raio hidráulico, em m; i = Declive, em m/m.

O raio hidráulico (R_H) refere-se à razão entre a área de escoamento da foz (A) e o seu respetivo perímetro molhado (P), ou seja, apenas onde o caudal escoado estará sujeito ao atrito com a superfície do leito.

3.2. Caudal de Ponta de Cheia

Para determinar o *Fill Rate* é necessário proceder à razão entre o caudal de ponta de cheia e a capacidade de escoamento da zona crítica, sendo a última, determinada pela equação de Manning-Strickler. Para o cálculo do caudal de ponta de cheia, utilizaram-se diversas metodologias consolidadas a nível mundial, sendo: Racional (Eq. (3)), Forti (Eq. (4)), Pagliario (Eq. (5)) e Mockus (Eq. (6)) (LOUSADA; CAMACHO, 2018).

$$Q_{RACIONAL} = \frac{C \times I \times A}{3,6} \quad (3)$$

$$Q_{FORTI} = A \times \left(b \times \frac{500}{A + 125} + c \right) \quad (4)$$

$$Q_{PAGLIARIO} = A \times \left(\frac{2900}{90 + A} \right) \quad (5)$$

$$Q_{MOCKUS} = \frac{2,08 \times A \times P}{\sqrt{t_c} + 0,6 \times t_c} \quad (6)$$

Onde: C = Coeficiente de escoamento superficial, adimensional; A = Área da bacia em estudo, em km²; b = 2,35 para precipitação diária máxima inferior à 200 mm e 3,25 para valores superiores à 200 mm; c = 0,5 para precipitação diária máxima inferior à 200 mm e 1 para valores superiores à 200 mm; P = Precipitação, em cm; t_c = Tempo de concentração, em horas.

3.3. Intensidade de Precipitação

O cálculo do caudal de ponta de cheia para algumas metodologias requer o valor referente à intensidade de precipitação característico da região (GONÇALVES et al., 2020a). Sendo assim, foi necessário recorrer aos históricos de precipitação fornecidos pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). A plataforma fornece para Machico informações hidrológicas de 1998 a 2014, advindos do Posto Florestal e da Estação de Tratamento de Água. Os valores referentes às precipitações máximas anuais foram listados através da adoção do maior valor diário apresentado pela análise das duas estações, considerando assim, o pior cenário para a bacia hidrográfica da ribeira de Machico.

Através dos valores de precipitações diárias máximas anuais com duração de 24 horas estabelecidos, a intensidade de precipitação foi determinada pela Distribuição de Gumbel, a qual permitiu estimar a intensidade em decorrência de um determinado tempo de retorno (T_R):

$$I = \frac{P}{t_c} \times [0,181 \times \ln(t_c) + 0,4368] \quad (7)$$

$$P = P_M + S' \times k \quad (8)$$

$$k = -\frac{6^{0,5}}{\pi} \times \left[0,577216 + \ln \left(\ln \left(\frac{T_R}{T_R - 1} \right) \right) \right] \quad (9)$$

Onde: I = Intensidade de precipitação, em mm/h; P = Precipitação estimada em 24 horas, em mm; t_c = Tempo de concentração, em horas; P_M = Média das precipitações analisadas, em mm; S' = Desvio padrão das amostras analisadas, em mm; T_R = Tempo de retorno do evento, em anos.

3.4. Tempo de Retorno

O tempo de retorno é caracterizado pelo intervalo médio de tempo que separa a ocorrência de eventos com valores semelhantes, portanto, quanto mais extremo for o evento, maior será o tempo de retorno em que o evento será igualado ou superado (GONÇALVES, 2020). Para Lousada e Camacho (2018), o tempo de retorno refere-se à raridade de eventos extremos como as grandes cheias, mas também as grandes secas.

A recomendação do número de anos a ser considerado é bastante variada, em drenagem urbana os projetos devem ser considerados de maior importância econômica e, portanto, recomenda-se utilizar o período de retorno de 50 ou 100 anos (CARVALHO; SILVA, 2006). Para o presente estudo será considerado um tempo de retorno de 100 anos, como forma de estabelecer um dimensionamento para a situação mais crítica entre as duas recomendações.

3.5. Tempo de Concentração

O tempo de concentração corresponde ao tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua para o escoamento na foz após uma precipitação (VILLELA; MATTOS, 1975; MARTINS; CANDIDO, 2012; JUSTI JUNIOR; ANDREOLI, 2015; GONÇALVES; LOUSADA, 2020). Verifica-se que de acordo com a própria definição de tempo de concentração, entende-se que uma chuvada crítica possui uma duração igual ou superior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica. Contudo, este conceito só é sustentado em pequenas bacias, devido à improbabilidade de ocorrência de chuvas igualmente distribuídas, tanto no âmbito temporal quanto espacial em bacias de grandes dimensões (RODRIGUES; GUIMARÃES; MOREIRA, 2011).

Neste sentido, de acordo com Mano (2008) e Lencastre e Franco (2006), no que concerne ao estudo das cheias, a duração de uma precipitação intensa a considerar deve ser no mínimo igual ao tempo de concentração, uma vez que se torna necessário garantir que toda a bacia hidrográfica esteja a contribuir para o escoamento na foz. Para a determinação do tempo de concentração utilizou-se da média aritmética de três metodologias, sendo elas: Kirpich (Eq. (10)); Témez (Eq. (11)) e Giandotti (Eq. (12)) (LOUSADA et al., 2021).

$$t_{c\text{-Kirpich}} = 0,95 \times \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (10)$$

$$t_{c\text{-Témez}} = \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (11)$$

$$t_{c\text{-Giandotti}} = \frac{(4 \times \sqrt{A}) + (1,5 \times L)}{0,8 \times \sqrt{H_M}} \quad (12)$$

Onde: t_c = Tempo de concentração, em horas; L = Comprimento do curso de água principal, em km; ΔH = Diferença entre a cota máxima e mínima do curso de água principal, em m; i = Inclinação média do curso de água principal, em m/m; A = Área da bacia hidrográfica, em km²; H_M = Altura média da bacia hidrográfica, em m.

4. Resultados e Discussões

Para efetuar a verificação da propensão de cheias pelo *Fill Rate*, o primeiro parâmetro calculado refere-se à precipitação expectável para um tempo de recorrência de 100 anos, utilizando a base nos dados de precipitação diária do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (Tabela 2).

Tabela 2. Precipitação máxima diária anual. Fonte: SNIRH (2020).

Nº de Amostras	Ano	Precipitação Diária Máxima Anual (mm/dia)
1	1998/1999	48,000
2	1999/2000	61,000
3	2000/2001	160,000
4	2001/2002	90,000
5	2002/2003	68,900
6	2003/2004	65,000
7	2004/2005	111,000
8	2005/2006	105,000
9	2006/2007	87,700
10	2007/2008	79,400
11	2008/2009	137,200
12	2009/2010	193,000
13	2010/2011	162,200
14	2011/2012	43,200
15	2012/2013	217,700
16	2013/2014	163,100

Posteriormente, determinou-se a curva de precipitação expectável de acordo com a variação do tempo de retorno e, conseqüentemente, o fator de frequência (k) (Figura).

Note-se que a projeção possui maior coeficiente angular para tempos de retorno com menor raridade, o que denota uma maior variabilidade na precipitação estimada entre 0 e 50 anos e, conforme apresentado na Figura , a partir do ano 100 há uma redução gradual da variabilidade ao longo do aumento do tempo de retorno. Portanto,

quanto mais raro o evento, menor a variação de precipitação entre os anos, como pode ser visualizado entre nos casos mais extremos do gráfico, respectivamente 450 e 500 anos.

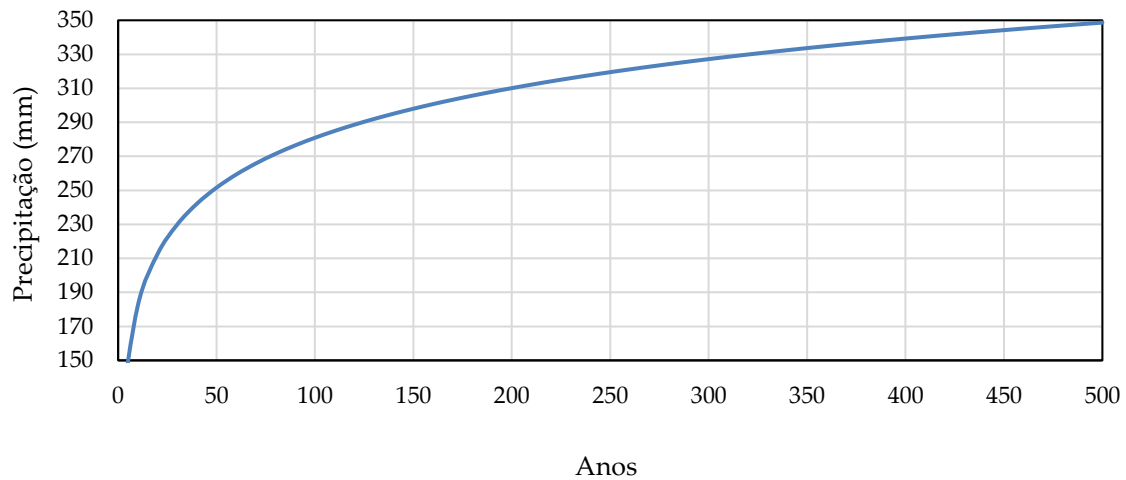


Figura 5. Projeção da precipitação de acordo com o tempo de retorno. Fonte: Autor (2023).

Uma vez que o tempo de retorno empregue no presente estudo é de 100 anos, obteve-se os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Precipitação expectável de acordo com a Distribuição de Gumbel. Fonte: Autor (2023).

Precipitação Média (mm/dia)	Desvio Padrão (mm/dia)	Fator de Frequência (100 anos)	Precipitação Expectável (mm/dia)
112,025	53,844	3,136	280,916

Por fim, o último parâmetro necessário para determinar do caudal expectável é o tempo de concentração, os quais estão expressos na Tabela 4 de acordo com as metodologias utilizadas.

Tabela 4. Determinação do tempo de concentração. Fonte: Autor (2023).

Metodologia	Tempo de Concentração (horas)
Kirpich	1,188
Témez	3,206
Giandotti	2,354
Média	2,249

Posteriormente, através da equação de Manning-Strickler determinou-se a capacidade de escoamento da foz e os respetivos *Fill Rates* para cada metodologia empregue neste estudo (Tabela 5).

Tabela 5. Determinação do caudal expectável e os respetivos valores de *Fill Rate*. Fonte: Autor (2023).

Metodologia	Caudal Expectável (m³/s)	Capacidade de Escoamento da Foz (m³/s)	Fill Rate (%)
Forti	292,306	358,512	82%
Racional	379,424		106%
Pagliario	623,486		174%
Mockus	379,090		106%
Média	418,577		117%

Note-se que para a determinação da capacidade de escoamento da foz considerou-se que o coeficiente de rugosidade das paredes (n_p) corresponde à alvenaria de pedra argamassada em boas condições ($n=0,020$), enquanto o leito (n_f) é caracterizado por um canal pedregoso com presença de vegetação em más condições ($n=0,040$), apresentados na Tabela 6. No que concerne ao declive, utilizou-se o valor de 0,01 m/m, como forma de

aproximação ao máximo de uma superfície plana e com velocidade de escoamento limitada pelas irregularidades do terreno. Por fim, as dimensões utilizadas para a foz correspondem à uma altura de 3 m e largura de 24 m.

Tabela 6. Coeficientes de rugosidade para diferentes tipos de materiais. Fonte: Gonçalves (2016).

Coeficientes de Rugosidade de Manning-Strickler				
Natureza do Fundo	Muito Boa	Boa	Regular	Má
Alvenaria de pedra argamassada	0.017	0.020	0.025	0.030
Canais com fundo em terra e talude com pedras	0.028	0.030	0.033	0.035
Canais com leito pedregoso e talude vegetado	0.025	0.030	0.035	0.040
Canais com revestimento de betão	0.012	0.014	0.016	0.018

Assim sendo, verifica-se que 75% das metodologias sugerem o enchimento e transbordo da foz quando sujeita à uma precipitação de intensidade muito elevada – *i.e.* tempo de recorrência de 100 anos. Nota-se também que o método de Pagliario apresentou uma discrepância muito acentuada em relação às demais metodologias, o que denota uma certa incompatibilidade com a geomorfologia da bacia hidrográfica em estudo (Figura 6). Este desvio tende a ocorrer para casos em que as bacias hidrográficas de base para a elaboração da fórmula sejam muito distintas da bacia hidrográfica em questão. Entretanto, em média as metodologias sugeriram a necessidade de intervenção nas características físicas da foz, como forma de solucionar ou mitigar os efeitos das cheias extremas.

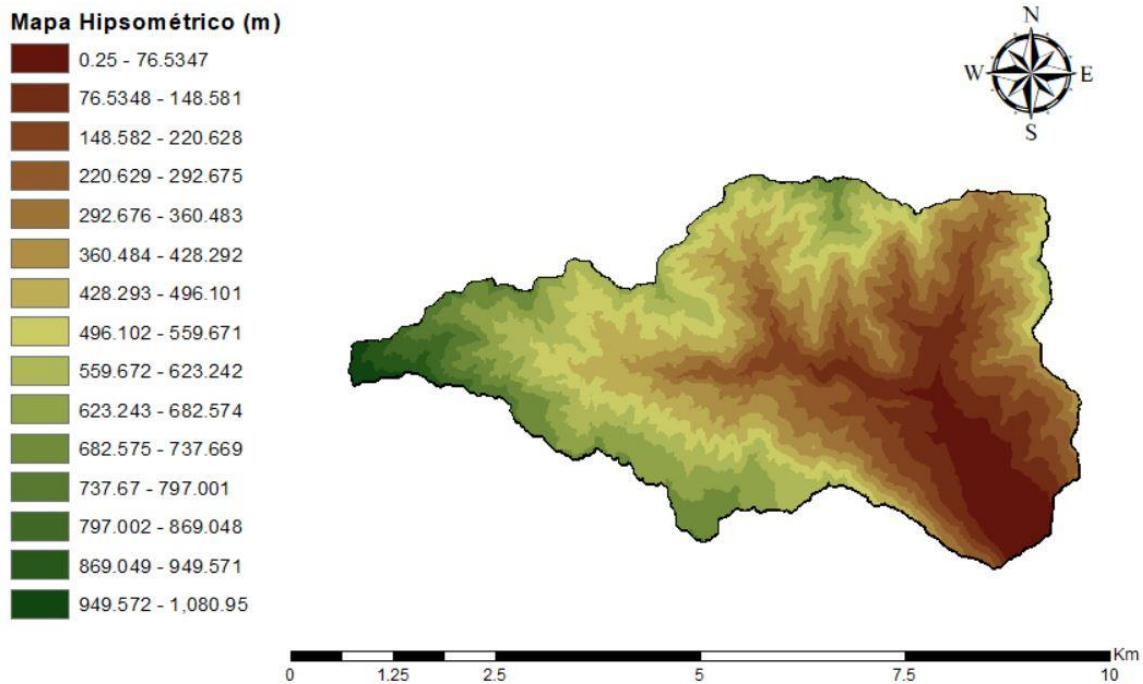


Figura 5 Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica da Ribeira de Machico, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira. Fonte: Autor (2023) – ArcGIS / ESRI.

A primeira etapa para a determinação de um coeficiente de rugosidade mínimo – *i.e.* que permita o escoamento seguro do caudal precipitado – consiste em estabelecer a variação da capacidade da foz de acordo com a mudança dos coeficientes de rugosidade médios (nm). Após a aplicação das formulações e conceitos abordados anteriormente, obteve-se todos os dados calculados para a capacidade de escoamento da foz e o caudal expectável para cada uma das metodologias, sendo o primeiro, variável de acordo com a alteração do coeficiente de rugosidade (Figura 7).

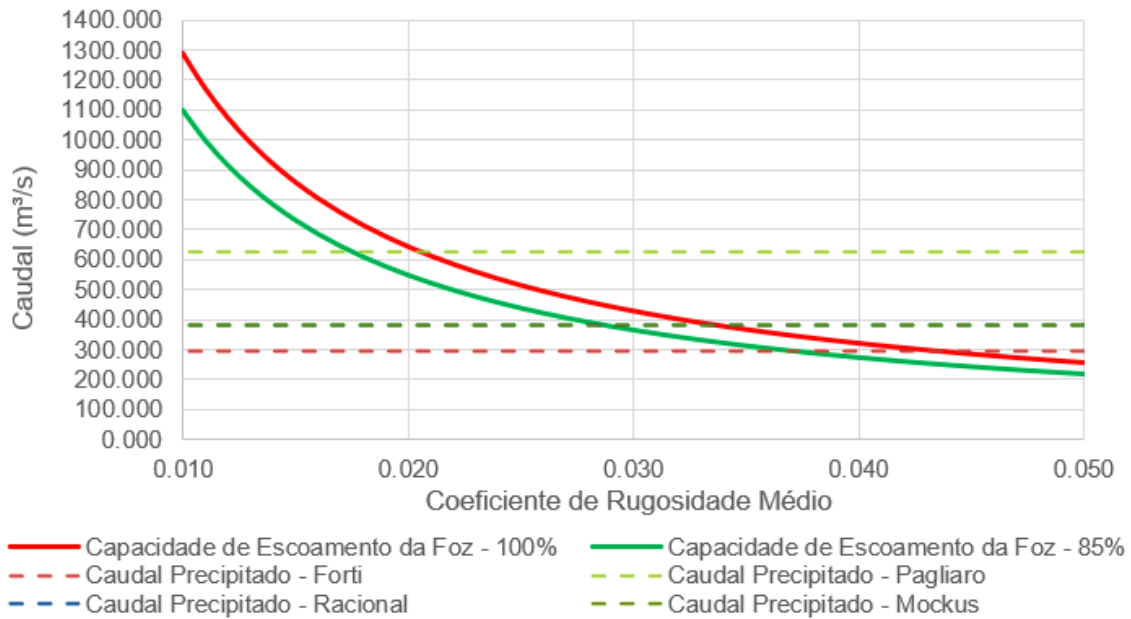


Figura 7. Variação da capacidade de escoamento da foz. Fonte: Autor (2023).

Através da Figura verifica-se que os coeficientes de rugosidade médios da foz apresentam dois valores distintos, um para cada aplicação do *Fill Rate*. As linhas segmentadas representam o caudal precipitado para cada uma das metodologias utilizadas e as linhas contínuas representam a capacidade de escoamento da foz para o *Fill Rate* limite de 100% e 85%, respectivamente. Portanto, as interseções das linhas segmentadas com as linhas contínuas inferem o coeficiente de rugosidade médio necessário para que a foz tenha a capacidade de escoar o caudal precipitado de acordo com os *Fill Rates* supracitados.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores dos coeficientes de rugosidade médios para cada *Fill Rate* e metodologia utilizada.

Tabela 7. Coeficientes de rugosidade médios necessários. Fonte: Autor (2023).

Metodologia	Caudal Precipitado (m³/s)	Capacidade		Capacidade		FR1 (%)	FR2 (%)
		nm - 100%	nm - 85%	da Foz 100% (m³/s)	da Foz 85% (m³/s)		
Forti	292,306	0,044	0,037	293,328	348,823	100%	84%
Pagliaro	623,486	0,020	0,017	645,322	759,203	97%	82%
Racional	379,424	0,034	0,029	379,601	445,050	100%	85%
Mockus	379,090	0,034	0,029	379,601	445,050	100%	85%

Em conformidade com o já abordado, na Tabela 7, verifica-se que o caudal expectável para um tempo de recorrência de 100 anos pela metodologia de Pagliaro apresenta uma discrepância muito elevada em relação à média encontrada pelas outras metodologias. Assim, devido a este fator, o coeficiente de rugosidade médio necessário para permitir o escoamento seguro por esta metodologia é muito reduzido, o que pode ocasionar em um sobredimensionamento se comparado às demais metodologias.

Uma vez que os coeficientes de rugosidade médios correspondem à média ponderada entre as diferentes composições que formam as paredes e o leito das ribeiras, para as paredes, fixou-se o coeficiente de rugosidade em 0,020, enquanto o coeficiente do leito apresentará uma variação até que atinja a capacidade de escoamento mínimo para cada metodologia. Este critério foi adotado uma vez que as paredes da ribeira tendem a sofrer uma menor deterioração – *i.e.* em comparação ao fundo – com o passar do tempo, onde a maior problemática encontra-se no leito da ribeira, a qual possui considerável vegetação e está sujeita a deposição de sedimentos com maior frequência.

Neste sentido, com a fixação do coeficiente de rugosidade das paredes e os coeficientes médios definidos na Tabela 7, pode-se determinar qual a configuração que o leito deve ter para que seja possível escoar o caudal precipitado (Tabela 8).

Tabela 8. Coeficientes de rugosidade mínimos para o leito da ribeira. Fonte: Autor (2023).

Metodologia	nm - 100%	nm - 85%	np	nf – 100%	nf - 85%
Forti	0,044	0,037	0,020	0,050	0,041
Pagliario	0,020	0,017	0,020	0,020	0,016
Racional	0,034	0,029	0,020	0,038	0,031
Mockus	0,034	0,029	0,020	0,038	0,031

Por fim, verifica-se que para 75% das metodologias utilizadas há a necessidade de reduzir o coeficiente de rugosidade, como forma de aumentar a capacidade de escoamento da foz (LOUSADA et al., 2021; LOUSADA; GONÇALVES; ATMACA, 2022). Ao excluir os valores com desvio muito acentuado – *i.e.* método de Pagliario – obteve-se resultados que indicam um coeficiente de rugosidade para o leito de aproximadamente 0,030, ou seja, é possível manter a natureza pedregosa e vegetada do leito desde que estejam com boas condições.

No que concerne à gestão dos valores do coeficiente de rugosidade da Ribeira de Machico da bacia hidrográfica, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira, optou-se por permanecer com a característica pedregosa e vegetada do leito, apenas efetuando a melhoria das condições do estado de conservação, por forma a minimizar o impacto ambiental. Esta opção deu-se pelo facto de uma retirada total das pedras, sedimentos e vegetações do leito seria um processo oneroso, moroso e frequente. Para as paredes, a manutenção não deverá ser frequente, uma vez que o desgaste por abrasão ocorreria exclusivamente em aluviões que tendem a escoar um elevado volume de água e sedimentos granulares de grandes dimensões (LOUSADA et al., 2021; LOUSADA; GONÇALVES; ATMACA, 2022).

Apesar de uma medida simples, a gestão dos valores do coeficiente de rugosidade da ribeira apresentou uma efetividade considerável, permitindo que a foz tenha a capacidade de escoar o caudal precipitado (LOUSADA et al., 2021; LOUSADA; GONÇALVES; ATMACA, 2022).

Devido à impossibilidade de considerar todos os aspetos que compõem uma análise e um dimensionamento mais criterioso, outros estudos adjacentes podem ser realizados com a finalidade de otimizar os resultados aqui apresentados, como a análise da capacidade de infiltração do solo; análise da capacidade de escoamento do sistema hidráulico urbano existente; análise da deposição de sedimentos; verificação da deterioração das paredes do canal por abrasão; análise do crescimento urbano e a respetiva influência no aumento do caudal escoado para a foz e etc.

5. Conclusões

Através do presente estudo, observou-se que a bacia hidrográfica da ribeira de Machico possui propensão às cheias advindas de eventos com 100 anos de raridade, uma vez que 75% das metodologias aplicadas (Racional, Pagliario e Mockus) apresentaram valores de *Fill Rate* superiores à recomendação de 85% feita por Porto et al. (1993), e até mesmo o limite natural da ribeira, superando os 100% de enchimento da mesma. Esta propensão às cheias é reforçada pelo relatório de risco de cheias da Direção Regional de Ordenamento Territorial e Ambiental (DROTA, 2017), onde constam 27 bacias hidrográficas da Região Autónoma da Madeira que estão sujeitas ao fenómeno supracitado e, entre as bacias mencionadas, encontra-se a bacia hidrográfica da ribeira de Machico.

Posteriormente, através das metodologias apresentadas, obteve-se os valores de coeficiente de rugosidade médios necessários para assegurar o escoamento do caudal precipitado, tanto para o enchimento de 100% da ribeira quanto para o limite de segurança estabelecido de 85% de enchimento. Entretanto, como os coeficientes de rugosidade das paredes da ribeira e de seu respetivo leito são diferentes, o valor do coeficiente de rugosidade médio corresponde à média ponderada entre ambos. Uma vez que as paredes tendem a sofrer menor degradação e deposição de sedimentos ao longo dos anos, evidencia-se que o leito sofrerá alterações com maior frequência e apresenta-se como o elemento balizador do presente estudo. Portanto, manteve-se o coeficiente de rugosidade das paredes como 0,020 enquanto o coeficiente foi trabalhado de forma a assegurar a capacidade de escoamento da foz.

De modo geral, como os valores encontrados pelo método de Pagliario apresentaram-se demasiado discrepantes das demais metodologias, logo estes valores tendem a não possuir uma boa fiabilidade. Por outro

lado, o método de Mockus e Racional apresentaram valores muito próximos – *i.e.* para os caudais e, conseqüentemente, para os coeficientes de rugosidade – sendo esses os valores de referência a serem considerados como os resultados satisfatórios do presente estudo. Portanto, segundo os resultados obtidos no presente estudo, recomenda-se que o coeficiente de rugosidade das paredes seja mantido em boas condições (0,020), enquanto o coeficiente de rugosidade do leito deve possuir valor máximo de 0,030, ou seja, é possível manter a natureza pedregosa e vegetada do fundo da ribeira desde que possua uma manutenção frequente para a retirada do excesso de vegetação e pedras que possam dificultar o escoamento do caudal precipitado.

Embora a alteração do coeficiente de rugosidade do leito e das paredes da Ribeira de Machico da bacia hidrográfica, situada no concelho do Machico, na Ilha da Madeira possa parecer uma medida relativamente simples e indigna de ser considerada, com toda a certeza provou mitigar o impacto da cheia cumprindo o seu principal objetivo sobre as infraestruturas e patrimônio de todos nós.

Assim sendo, este estudo deixa uma clara porta aberta para outros que possam complementar seus conteúdos e metodologias otimizando suas técnicas. Para melhorar a solicitação e o sistema hidráulico urbano muitas vezes complexo, espera-se também que novos estudos se debrucem sobre a necessidade de reduzir a deposição de sedimentos, que parece ter um enorme impacto a longo prazo sobre a capacidade de drenagem do curso de água e, em última instância, evitar um grande impacto de inundação (YU et al., 2020).

Por outro lado, a abrasão mecânica das paredes desta ribeira (Ribeira de Machico) e o tempo que muitas vezes os poderes públicos locais demoram a realizar qualquer tipo de manutenção, têm sido duas fortes razões para a degradação dos afluentes do curso principal e, conseqüentemente, para a menor qualidade da água descartada e, portanto, surge em função do anteriormente descrito a necessidade de estudar e melhorar estas razões (SHRESTHA; WANG, 2020; LI; LI; SHI, 2020). Além disso, a taxa de crescimento urbano projetada para o concelho do Machico, da Ilha da Madeira, e como essa taxa pode afetar a impermeabilização do solo e, finalmente, o escoamento superficial deve ser uma preocupação a ser estudada, complementando o resultado deste trabalho.

No seu geral, este estudo aprimora as metodologias e técnicas utilizadas em estudos de caso semelhantes como válidas e apropriadas para o desenvolvimento científico com base na modelação e simulações de cenários de inundação (VARGUES; LOURES, 2008; NUNES et al., 2014).

Contribuições dos Autores: Concepção, S.L.; metodologia, S.L.; software, S.L.; validação, S.L.; análise formal, S.L.; pesquisa, S.L.; recursos, S.L.; preparação de dados, S.L.; escrita do artigo, S.L.; revisão, S.L.; supervisão, S.L.; aquisição de financiamento, S.L.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

Agradecimentos: Nada a assinalar.

Conflito de Interesse: O autor declara não haver conflito de interesse.

Referências

1. BARICHIVICH, J.; GLOOR, E.; PEYLIN, P.; BRIENEN, R.J.W.; SCHÖNGART, J.; ESPINOZA, J.C.; PATTNAYAK, K.C. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science advances*, v. 4, n. 9, eaat8785, 2018. DOI: 10.1126/sciadv.aat8785.
2. BRYANT, E. *Natural hazards*. 2ª Ed, New York: Cambridge University Press, 2005. 330p.
3. CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Estimativa de área impermeável de microbacias urbanas. *Caderno de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 2, p. 79-94, 1994.
4. CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. *Escoamento Superficial. Hidrologia*, cap. 7. UFRRJ, 2006. p. 95-115.
5. CHOW, V. T. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W., IV Series. ISBN: 0 07-010810-2, 1988. 540p.
6. DROTA. *Identificação das Zonas Críticas a Cartografar Considerando os Impactos da Ocorrência de Inundações (Com Risco Potencial Significativo)*. Funchal: Direção Regional de Ordenamento do Território e Ambiente, 2017. 50p.
7. FERNANDES, M. J. P. *Riscos no Concelho da Ribeira Brava: Movimentos de vertente cheias rápidas e inundações*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Dinâmicas Sociais e Riscos Naturais pela Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. 2009. 328p.
8. FRANCO, E.; FILL, H. *Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. 2004. 155p.

9. GONÇALVES, J. **Caracterização do coeficiente de rugosidade e seu efeito no escoamento em Canais Naturais. Simulação e Modelação (à escala) no laboratório de hidráulica. Aplicação às ribeiras do Funchal.** Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. 2016. 168p.
10. GONÇALVES, L. B. **Análise teórico-prática do risco de cheias no Arquipélago da Madeira – Caso de estudo dos concelhos do Funchal, Machico, Ribeira Brava e São Vicente.** Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. 2020. 195p.
11. GONÇALVES, L. B.; LOUSADA, S. A. N. **Análise probabilística de cheias e o uso de bacias de detenção como medida mitigadora: aplicação à bacia de Santa Luzia.** *Monfragüe Desarrollo Resiliente*, v. XIII, ISSN 2340-5457, 2020. p. 69-84.
12. GONÇALVES, L. B.; RODRIGUES, W. T.; CURITIBA, A. S.; TORRES, H.; LOUSADA, S. A. N. **Utilização de bacias de detenção para mitigação de cheias em áreas urbanas.** *Espacios y Sociedades em Transformación*, 1º Ed., Pamplona: Thomson Reuters Aranzadi, v. VI, 2020a. p. 209-221.
13. GONÇALVES, L.B.; LOUSADA, S. A. N.; LIS, M. A utilização da bacia de detenção para o controlo e regularização de caudais a jusante, sua sustentabilidade. *Espacios y Sociedades em Transformación*, 1º Ed., Pamplona: Thomson Reuters Aranzadi, v. VI, 2020b. p. 505-518.
14. HORTON, R. E. **The role of infiltration in the hydrologic cycle.** *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. XIV, Malden, EUA, 1933. p. 446-460.
15. HOUGH, M. **Naturaleza y ciudad: Planificación urbana y procesos ecológicos.** Barcelona: Gustavo Gilli, 1998. 315p.
16. JUSTI JUNIOR, J.; ANDREOLI, C. V. Uso de dados climáticos e hidrológicos como subsídio na determinação do regime de fluxo de canais de drenagem. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v.16, n.1, (Jan-Mar) p.177-189, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i1.422.
17. LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. **Lições de Hidrologia.** 3ª edição revista. Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2006. 451p.
18. LI, Z.; LI, J.J.; SHI, X.P. A Two-Stage Multisite and Multivariate Weather Generator. *Journal of Environmental Informatics*, 35, p. 148–159, 2020. DOI: 10.3808/jei.201900424.
19. LOUSADA, S.; CABEZAS, J.; CASTANHO, R.A.; GÓMEZ, J.M.N. Hydraulic Planning in Insular Urban Territories: The Case of Madeira Island –Ribeira Brava. *Water*, v. 13, 2951, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13212951>.
20. LOUSADA, S. A. N.; CAMACHO, R. **Hidrologia, recursos hídricos e ambiente - Aulas Teóricas.** Vol. I, ISBN 978-989-8805-33-1, Universidade da Madeira, 2018. 230 p.
21. LOUSADA, S.; GONÇALVES, L.; ATMACA, A. Hydraulic Planning in Insular Urban Territories: The Case of Madeira Island –São Vicente. *Water*, v. 14, 112, 2022. DOI: 10.3390/w14010112.
22. LOUSADA, S. A. N.; GONÇALVES, L. B.; VELARDE, J. G. Controlo e regularização de caudais excedentes por meio de bacia de detenção: simulação para bacia hidrográfica de João Gomes, Funchal. *Espacios y Sociedades em Transformación*, 1º Ed., Pamplona: Thomson Reuters Aranzadi, v. VI, 2020. p. 47-60.
23. LUNA, T.; ROCHA, A.; CARVALHO, A. C.; FERREIRA, J. A.; SOUSA, J. Modelling the extreme precipitation event over Maeira Island on 20 February 2010. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2437-2452, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2437-2011>.
24. LYMAN, R. E.; SCHROEDER, T. A.; BARNES, G. M. The heavy rain event of 29 October 2000 in Hana, Maui. *Weather Forecast*, p. 397-414. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF868.1>.
25. MANO, E. R. **Estudo de Bacias de Retenção como solução para situações crescentes de urbanização.** Dissertação elaborada para a obtenção do grau de Mestre pela Universidade do Porto. 2008. 168p.
26. MARTINS, M. F.; CANDIDO, G. A. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável para Localidades: uma proposta metodológica de construção e análise. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. São Paulo, v.6, n. 1, ISSN: 1981-982X, p. 03-19, 2012. DOI: 10.5773/rgsa.v6i1.229
27. NUNES, J.R.; RAMOS-MIRAS, J.; LOPEZ-PINEIRO, A.; LOURES, L.; GIL, C.; COELHO, J.; LOURES, A. Concentrations of available heavy metals in Mediterranean agricultural soils and their relation with some soil selected properties: A case study in typical Mediterranean soils. *Sustainability*, 6, 9124–9138, 2014. DOI: 10.3390/su6129124.
28. PORTO, R. L.; FILHO, K. Z.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F. **Drenagem Urbana.** *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2ª Edição. Editora da Universidade UFRGS, 1993. 279p.
29. PRADA, S.; GASPAS, A.; SEQUEIRA, M. M.; NUNES, A. Disponibilidades Hídricas na Ilha da Madeira. In Book: AQUAMAC – Técnicas e métodos para a gestão sustentável da água na Macaronésia. Disponibilidades Hídricas na Ilha da Madeira, *Instituto Tecnológico das Canarias*, Cabildo de Lanzarote, Consejo Insular de Aguas de Lanzarote, Espanha, 2005. pp. 261-294.
30. RODRIGUES, C.; GUIMARÃES, R. C.; MOREIRA, M. **Apontamentos para as aulas de Hidrologia.** Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora, 2011. 143p.

31. SHRESTHA, N.K.; WANG, J. Water Quality Management of a Cold Climate Region Watershed in Changing Climate. **Journal of Environmental Informatics**, 35, p. 56–80, 2020. DOI: 10.3808/jei.201900407.
 32. SILVA, C. S.; SANTIAGO, A. Urbanização e Inundação: Conflitos e Possibilidades. Paisagem Ambiente: Ensaios n. 24. ENEPEA, São Paulo, 2007. p. 327-334. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.v0i24p327-334.
 33. SNIRH. **Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos**. 2020. Disponível em: <<https://snirh.apambiente.pt/>>.
 34. TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2ª Edição. Editora da Universidade UFRGS, 1993. 943p.
 35. TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 1995. 414p.
- VARGUES, P.; LOURES, L. Using Geographic Information Systems in Visual and Aesthetic Analysis: The case study of a golf course in Algarve. **WSEAS Transactions on Environment and Development**, Vol. 4, No. 9, p. 774-783, 2008.
36. VIEIRA, I. L. S.; BARRETO, V.; FIGUEIRA, C.; LOUSADA, S.; PRADA, S. The use of detention basins to reduce flash flood hazard in small and step volcanic watersheds – a simulation from Madeira Island. **Journal of Flood Risk Management**, Volume 11, p. S555-S1136, 2016. DOI: 10.1111/jfr3.12285.
 37. VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. Editora Mc Graw Hill, São Paulo, 1975. 245p.
 38. YU, B.Y.; WU, P.; SUI, J.; NI, J.; WHITCOMBE, T. Variation of Runoff and Sediment Transport in the Huai River – A Case Study. **Journal of Environmental Informatics**, 35, p. 138–147, 2020. DOI: 10.3808/jei.202000429.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.