

DM

**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 DE MESTRADO

Jaime André Vieira Gonçalves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

dezembro | 2016

**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 DE MESTRADO

Jaime André Vieira Gonçalves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR
Sérgio António Neves Lousada



Centro de Competências de Ciências Exatas e da Engenharia

**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 submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade
da Madeira

por

Jaime André Vieira Gonçalves

Orientador

Prof. Doutor Sérgio António Neves Lousada

(Universidade da Madeira)

dezembro de 2016

Título: 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.

Palavras-Chave: Canal natural, Coeficiente de rugosidade, Hidrodinâmica de escoamento, Resistência ao escoamento.

Keywords: Flow resistance, Hydrodynamics flow, Natural channels, Roughness Coefficient.

Autor: JAIME GONÇALVES

CCCEE – Centro de Competências de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário de Penteada

9020-015 Funchal - Portugal. s/n

Telefone +351 291 705 230

Correio eletrónico: secretariado-centros@uma.pt

Funchal, Madeira

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de mestrado representa um período de evolução e de esforço que se tornou possível graças à colaboração de algumas pessoas e entidades, a todos, um sincero agradecimento

Em primeiro lugar, devo um profundo agradecimento ao Professor Doutor Sérgio António Neves Lousada, responsável pela orientação desta dissertação, não só pelo constante apoio e acompanhamento ao longo do trabalho, mas também transmissão de uma metodologia de trabalho, baseada na autonomia e na iniciativa.

Aos meus pais e irmãs, agradeço o conforto e estabilidade que sempre me proporcionaram, revelando-se suportes fundamentais no desenvolvimento de todo o processo, a eles, o meu obrigado.

À Universidade da Madeira, por dispor o laboratório de Hidráulica, importante para a realização desta dissertação, e deste modo aumentar o meu conhecimento na área de Hidráulica.

Por último, agradeço aos meus amigos e colegas da UMa pelo companheirismo e amizade demonstrada ao longo destes anos.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivos principais: a caracterização e evolução de instrumentos numéricos de demonstração do comportamento do escoamento, nomeadamente, a caracterização do coeficiente de rugosidade em canais naturais; utilização de um modelo à escala reduzida para simulação hidrodinâmica, considerando diferentes coeficientes de rugosidade; comparação dos diferentes resultados obtidos entre os coeficientes adotados e estimados; análise e controle em canais naturais, situação, que pode ser nefasta para o dimensionamento de obras hidráulicas.

Para uma primeira abordagem é preciso uma recolha de informação bibliográfica disponível, após este processo e recorrendo aos modelos digitais e ao programa ArcGis, são caracterizadas as três bacias hidrográficas da cidade do Funchal, que nos foi possível alcançar os dados das características geométricas, de relevo e drenagem.

Após este processo é feita uma análise da precipitação usando folhas de cálculo e dados facultados pelas instituições competentes, de modo a adquirir valores de precipitação média diária e anual para utilização de fórmulas, de modo a fazer o cálculo dos valores para o tempo de concentração e caudais.

De seguida são selecionados os vários troços dos canais em estudo com características morfológicas diferentes relevantes e recorrendo aos equipamentos disponíveis no Laboratório de Hidráulica, modelo reduzido, à folha de cálculo e ao programa HEC-RAS, modelo numérico, executa-se a simulação e estudo desses troços, com a obtenção de resultados semelhantes entre as várias metodologias executadas e de concordância com o expectável para os valores dos diferentes coeficientes de rugosidade considerados.

No final, são apresentadas as conclusões, considerações finais e objetivos a manter ou a alcançar nos imediatos anos, onde incluem, recomendações visando, melhorar o método de caracterização para escoamento em canais naturais, de acordo com os valores dos diferentes coeficientes de rugosidade considerados.

Palavras-Chave: Canal natural, Coeficiente de rugosidade, Hidrodinâmica de escoamento, Resistência ao escoamento.

ABSTRACT

This dissertation has as main objectives: the characterization and evolution of numerical instruments of demonstration of the behavior of outflows, namely the characterization of the roughness coefficient in natural channels; utilization of a reduced model to simulate hydrodynamics, considering different roughness coefficient, comparison of different results obtained between adopted and estimated coefficients; analysis and control in natural channels, situation that could be disastrous for sizing hydrodynamics works.

For a first approach, its necessary to select the available bibliography information, after this process and using digital models and ArcGIs program, the three watersheds of the city of Funchal that were possible to reach their geometrical characterization, of relief and drainage, were characterized. After this process an analysis is made of the precipitation using spreadsheets and data provided by competent institutions, in order to acquire daily and annual average values of precipitation for utilization of formulas, in order to calculate values for concentration times and flow rates.

Next, various sections of channels are selected in a study with the different relevant morphological characteristics and using equipment available in the Hydraulics Laboratory, reduced model to the spreadsheet and the HEC-RAS program, numeric model, a simulation and study of these channels is executed, obtaining similar results between the various methodologies executed and the concordance with the expectable for the values of the roughness coefficient considered.

At last, the final conclusions and considerations are presented as well as the objectives to maintain or to achieve in the immediate years to come, where included are: recommendations aiming, to better the method of characterization for flows in natural channels, according with the different values of roughness coefficient considered.

Keywords: Flow resistance, Hydrodynamics flow, Natural channels, Roughness Coefficient.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Introdução	2
1.2. Métodos de Desenvolvimento	3
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	7
2.1. Bacia hidrográfica.....	8
2.1.1. Delimitação da bacia hidrográfica	9
2.1.2. Atributos fisiográficos da bacia hidrográfica	10
2.1.2.1. Atributos geométricos.....	10
2.1.2.2. Tipos de planos de drenagem	13
2.1.2.3. Atributos do relevo.....	20
2.1.2.4. Geologia, solos e coberto vegetal.....	25
2.2. Tipos e regimes de escoamento.....	27
2.2.1. Direção da trajetória.....	28
2.2.2. Variação no tempo.....	29
2.2.3. Variação da trajetória	30
2.2.4. Movimento de rotação.....	30
2.2.5. Tipos de aluviões	30
2.3. Caracterização da secção transversal.....	30
2.4. Caudal de ponta de cheia.....	31
2.4.1. Apreciações gerais	31
2.4.1.1. Fórmulas empíricas	32
2.4.1.2. Fórmulas cinemáticas.....	34
2.5. Hidrogramas de cheia	41
2.5.1. Apreciações principais	41
2.5.2. Fatores que influenciam o hidrograma	42
2.5.2.1. Forma do hidrograma	42
2.5.2.2. Fatores que podem afetar a forma do hidrograma.....	43
2.5.3. Hidrograma unitário e chuva unitária.....	43
2.6. Curvas de regolfo - canais prismáticos.....	45
2.7. Coeficiente de rugosidade	47
3. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA EM ESTUDO E INTEGRAÇÃO NA REGIÃO... 49	
3.1. Integração geral	50
3.2. Enquadramento e caracterização do caso de estudo	50
3.2.1. ArcMap 10.2.1 - Metodologia	50

3.2.2. Caracterização das bacias hidrográficas.....	58
4. ORGANIZAÇÃO DE DADOS E TRATAMENTO DE RESULTADOS	65
4.1. Organização de dados	66
4.1.1. Precipitações intensas	66
4.1.2. Análise probabilística	68
4.1.2. Modelação	74
4.1.2.1. Modelos numéricos	74
4.1.2.2. Modelo reduzido	78
4.2. Tratamento de Resultados	83
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
5.1. Conclusões.....	92
5.2. Aspetos a melhorar para trabalhos futuros	93
BIBLIOGRAFIA.....	95
ANEXOS.....	98
ANEXO 1.....	99
ANEXO 2.....	110
ANEXO 3.....	124
ANEXO 4.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Canal Hidráulico.	2
Figura 2 - Metodologia da dissertação.	4
Figura 3 - Bacia hidrográfica (Martucci, 2014).	8
Figura 4 - Delimitação de uma bacia hidrográfica, adaptado de (Eduardo Paula, 2014).	9
Figura 5 - Bacia elíptica ou alongada e as características do escoamento originado por uma precipitação uniforme, (Milani, 2014).	10
Figura 6 - Bacia circular ou arredondada e as características do escoamento originado por uma precipitação uniforme, (Milani, 2014).	11
Figura 7 - Bacia radial ou ramificada e as características do escoamento originado por uma precipitação uniforme, (Milani, 2014).	11
Figura 8 - Categorias dos cursos de água, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010).	14
Figura 9 - Método de Strahler, (Fragoso, 2014).	15
Figura 10 - Método de Streve, (Fragoso, 2014).	16
Figura 11 - Curva hipsométrica, (Lima, 2009).	21
Figura 12 - Mapa hipsométrico de uma bacia, (Lousada, 2014).	22
Figura 13 - Perfil longitudinal de um canal, (Lima, 2009).	23
Figura 14 - Exemplos de drenagem, (Soares, 2013).	25
Figura 15 - Carta de solos de Machico 1992.	26
Figura 16 - Carta geológica de Machico 2010, (Prada, 2013).	26
Figura 17 - Classificação dos escoamentos, adaptado de (Fernandes, 2008).	27
Figura 18 - Canal natural.	31
Figura 19 - Integrantes do hidrograma, (Lousada, 2014).	41
Figura 20 - Forma do hidrograma, (Lousada, 2014).	42
Figura 21 - Tempo de base, (Lousada, 2014).	44
Figura 22 - Princípio de equilíbrio dos caudais, (Lousada, 2014).	44
Figura 23 - Princípio de correlação dos caudais, (Lousada, 2014).	45
Figura 24 - Curvas de regolfo para canais prismáticos. Declive fraco (f_1 , f_2 e f_3); Declive forte (F_1 , F_2 e F_3); Declive crítico (C_1 e C_2); Declive nulo (H_2 e H_3); Declive negativo (N_2 e N_3), (Manzanares, 1980).	47
Figura 25 - Limites das bacias.	52
Figura 26 - "Attribute Table" da bacia de S. João.	53
Figura 27 - exemplo da janela "Classification method"	53
Figura 28 - Mapa hipsométrico das bacias.	54
Figura 29 - Curva hipsométrica de Santa Luzia.	54
Figura 30 - Perfil longitudinal de Santa Luzia.	55
Figura 31 - Rede de drenagem Shreve.	56
Figura 32 - Rede de drenagem Strahler.	57
Figura 33 - Classificação de Strahler de acordo com o ArcGIS.	61
Figura 34 - Média aritmética, (Carvalho & Silva, 2006).	67
Figura 35 - Método dos polígonos de Thiessen, (Carvalho & Silva, 2006).	67
Figura 36 - Método das Isoietas, (Carvalho & Silva, 2006).	68
Figura 37 - Linha de possibilidade udométrica, T=100 anos.	72
Figura 38 - Janela do programa HEC-RAS.	75
Figura 39 - Janela para editar as secções.	76
Figura 40 - Fluxograma da folha programada.	77
Figura 41 - Canal hidráulico.	78
Figura 42 - Ajuste de inclinação, válvula de regulação de caudal e bomba centrífuga.	79
Figura 43 - Canal hidráulico, especificações.	79
Figura 44 - Indicativo de nível.	80
Figura 45 - Relva artificial.	80

Figura 46 - Enrocamento natural.....	81
Figura 47 - Canal multifunções com indicador de nível.	81
Figura 48 - Folha programada S. João - Misto.	85
Figura 49 - Programa HEC-RAS S. João - Misto.....	85
Figura 50 - Modelo transformado S. João - Misto.....	85
Figura 51 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. João - Misto.	86
Figura 52 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Misto.	87
Figura 53 - Coeficiente de rugosidade modelo S. João - Misto.	87
Figura 54 - Coeficiente de rugosidade média S. João - Misto.	88
Figura 55 - Sistema de coordenadas.	99
Figura 56 - Inserção dos ficheiros “.asc”.	99
Figura 57 - União dos ficheiros “.asc”.....	100
Figura 58 - Comando “Flow direction”.	100
Figura 59 - Comando “Flow accumulation”.....	101
Figura 60 - Criação novo “shapefile”.	101
Figura 61 - Criação novo “shapefile”.	102
Figura 62 - Barra “Editor”.	102
Figura 63 - Janela do Raster Calculator.....	103
Figura 64 - Iniciar novo projeto.....	103
Figura 65 - Editar geometria do canal.	104
Figura 66 - Editar o escoamento uniforme.	104
Figura 67 - Simulação do escoamento uniforme.	105
Figura 68 - Perfil longitudinal de São João.....	105
Figura 69 - Curva hipsométrica de São João.	106
Figura 70 - Perfil longitudinal de João Gomes.....	106
Figura 71 - Curva hipsométrica de João Gomes.	107
Figura 72 - Carta de ocupação e de usos do solo da ilha da Madeira.	108
Figura 73 - PDM do Funchal, planta.....	109
Figura 74 - Folha programada S. João - Vegetação.....	116
Figura 75 - Programa HEC-RAS S. João - Vegetação.	116
Figura 76 - Modelo transformado S. João - Vegetação.	116
Figura 77 - Folha programada S. João - Rochas.....	117
Figura 78 - Programa HEC-RAS S. João - Rochas.	117
Figura 79 - Modelo transformado S. João - Rochas.	117
Figura 80 - Folha programada S. Luzia - Vegetação.....	118
Figura 81 - Programa HEC-RAS S. Luzia - Vegetação.	118
Figura 82 - Modelo transformado S. Luzia - Vegetação.	118
Figura 83 - Folha programada S. Luzia - Rochas.....	119
Figura 84 - Programa HEC-RAS S. Luzia - Rochas.	119
Figura 85 - Modelo transformado S. Luzia - Rochas.	119
Figura 86 - Folha programada S. Luzia - Misto.	120
Figura 87 - Programa HEC-RAS S. Luzia - Misto.....	120
Figura 88 - Modelo transformado S. Luzia - Misto.....	120
Figura 89 - Folha programada J. Gomes - Vegetação.	121
Figura 90 - Programa HEC-RAS J. Gomes - Vegetação.	121
Figura 91 - Modelo transformado J. Gomes - Vegetação.....	121
Figura 92 - Folha programada J. Gomes - Rochas.	122
Figura 93 - Programa HEC-RAS J. Gomes - Rochas.....	122
Figura 94 - Modelo transformado J. Gomes - Rochas.....	122
Figura 95 - Folha programada J. Gomes - Misto.....	123
Figura 96 - Programa HEC-RAS J. Gomes - Misto.	123
Figura 97 - Modelo transformado J. Gomes - Misto.	123
Figura 98 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. João - Vegetação.....	124

Figura 99 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Vegetação.	124
Figura 100 - Coeficiente de rugosidade modelo S. João - Vegetação.	125
Figura 101 - Coeficiente de rugosidade média S. João - Vegetação.	125
Figura 102 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. João - Rochas.	126
Figura 103 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Rochas.	126
Figura 104 - Coeficiente de rugosidade modelo S. João - Rochas.	127
Figura 105 - Coeficiente de rugosidade média S. João - Rochas.	127
Figura 106 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. Luzia - Vegetação.	128
Figura 107 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Vegetação.	128
Figura 108 - Coeficiente de rugosidade modelo S. Luzia - Vegetação.	129
Figura 109 - Coeficiente de rugosidade média S. Luzia - Vegetação.	129
Figura 110 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. Luzia - Rochas.	130
Figura 111 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Rochas.	130
Figura 112 - Coeficiente de rugosidade modelo S. Luzia - Rochas.	131
Figura 113 - Coeficiente de rugosidade média S. Luzia - Rochas.	131
Figura 114 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. Luzia - Misto.	132
Figura 115 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Misto.	132
Figura 116 - Coeficiente de rugosidade modelo S. Luzia - Misto.	133
Figura 117 - Coeficiente de rugosidade média S. Luzia - Misto.	133
Figura 118 - Coeficiente de rugosidade folha programada J. Gomes - Vegetação.	134
Figura 119 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Vegetação.	134
Figura 120 - Coeficiente de rugosidade modelo J. Gomes - Vegetação.	135
Figura 121 - Coeficiente de rugosidade média J. Gomes - Vegetação.	135
Figura 122 - Coeficiente de rugosidade folha programada J. Gomes - Rochas.	136
Figura 123 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Rochas.	136
Figura 124 - Coeficiente de rugosidade modelo J. Gomes - Rochas.	137
Figura 125 - Coeficiente de rugosidade média J. Gomes - Rochas.	137
Figura 126 - Coeficiente de rugosidade folha programada J. Gomes - Misto.	138
Figura 127 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Misto.	138
Figura 128 - Coeficiente de rugosidade modelo J. Gomes - Misto.	139
Figura 129 - Coeficiente de rugosidade média J. Gomes - Misto.	139
Figura 130 - Lei com melhor ajuste para 1 dia.	146

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Razão da bifurcação.....	15
Tabela 2 - Densidade de drenagem.....	19
Tabela 3 - Coeficiente K_{ls} , (Lencastre & Franco, 2006).....	33
Tabela 4 - Coeficiente m_i , (Lencastre & Franco, 2006).....	33
Tabela 5 - Valores do coeficiente de escoamento, (Chow, 1964).....	35
Tabela 6 - Valores do coeficiente de escoamento, (Chow, 1964).....	35
Tabela 7 - Coeficiente de ajustamento, (Wright-McLaughlin, 1969).....	36
Tabela 8 - Valores da fórmula de Giandotti, (Lencastre & Franco, 2006).....	36
Tabela 9 - Valor de escoamento consoante utilização do solo, bacias urbanas, (Lencastre & Franco, 2006).....	39
Tabela 10 - Valor do escoamento para diferentes utilizações do solo, bacias rurais, (Mata-Lima, 2007).....	39
Tabela 11 - Valores de rugosidade de Manning, (Cirilo, 2001).....	48
Tabela 12 - Estações para o método de Thiessen.....	58
Tabela 13 - Características das bacias.....	63
Tabela 14 - Precipitação máxima.....	69
Tabela 15 - Precipitação máxima para 1, 2, 3, 4 e 5 dias.....	69
Tabela 16 - Leis estatísticas.....	71
Tabela 17 - Fator probabilidade.....	71
Tabela 18 - Precipitações máximas anuais.....	72
Tabela 19 - Precipitação máxima, T=100 anos.....	72
Tabela 20 - Caudal de cheia.....	73
Tabela 21 - Valores adotados.....	74
Tabela 22 - Relações entre o caso real e o modelo.....	82
Tabela 23 - Resultados para a secção da ribeira de São João - Misto.....	84
Tabela 24 - Ceficiente de rugosidade para os diferentes caudais de ponta.....	89
Tabela 25 - Alturas de água no modelo reduzido para os três casos da ribeira de S. João.....	110
Tabela 26 - Alturas de água no modelo reduzido para os três casos da ribeira de S. Luzia.....	110
Tabela 27 - Alturas de água no modelo reduzido para os três casos da ribeira de J. Gomes.....	111
Tabela 28 - Problemas entre o caso real e modelo reduzido.....	111
Tabela 29 - Resultados para a secção da ribeira de São João - Vegetação.....	112
Tabela 30 - Resultados para a secção da ribeira de São João - Rochas.....	112
Tabela 31 - Resultados para a secção da ribeira de S. Luzia - Vegetação.....	113
Tabela 32 - Resultados para a secção da ribeira de S. Luzia - Rochas.....	113
Tabela 33 - Resultados para a secção da ribeira de S. Luzia - Misto.....	114
Tabela 34 - Resultados para a secção da ribeira de J. Gomes - Vegetação.....	114
Tabela 35 - Resultados para a secção da ribeira de J. Gomes - Rochas.....	115
Tabela 36 - Resultados para a secção da ribeira de J. Gomes - Misto.....	115
Tabela 37 - Precipitações máximas anuais com a duração $d=24$ h, para ajuste 1 dia.....	140
Tabela 38 - Valores da normal reduzida relativa às precipitações máximas anuais em 24 h, para ajuste 1 dia.....	141
Tabela 39 - Leis Normal, de Gumbel, Galton e de Pearson III, para ajuste 1 dia.....	141

LISTA DE ACRÓNIMOS E SIMBOLOGIA

SÍMBOLOS

C	Coeficiente da fórmula racional
C_f	Coeficiente de ajustamento
C_{mass}	Coeficiente de massividade
CN	Número de curva ou número de escoamento
D_h	Densidade hídrica
D_m	Declive médio do curso de água
D_r	Densidade de drenagem
F_r	Número de Froude
H	Altura uniforme
\bar{H}	Altura média da bacia
I	Intensidade da precipitação
i_{10-85}	Declive 10-85 do curso de água
I_d	Índice de declive
i_q	Declive equivalente do curso de água
i_{relevo}	Índice de relevo
K_C	Coeficiente de compacidade
K_f	Coeficiente de forma
K_L	Índice de alongamento
K_s	Coeficiente de rugosidade
L	Comprimento do curso de água
L_b	Comprimento da bacia
L_t	Comprimento total dos cursos de água
N	Número de cursos de água
n_r	Porosidade
Q	Caudal
\bar{P}	Precipitação média
R_b	Razão de bifurcação
R_e	Número de Reynolds
R_h	Raio hidráulico
t_c	Tempo de concentração
U	Velocidade característica
\bar{u}	Velocidade média
\bar{Z}	Altitude média da bacia
Z_{eq}	Altura equivalente do curso de água

ACRÓNIMOS

CN	<i>Curve Number</i>
DROTA	Direção Regional do Ordenamento do Território e Ambiente
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HEC-RAS	<i>U.S. Army Corps of Engineers' River Analysis System</i>
LPU	Linha de Possibilidade Udométrica
MDT	Modelo Digital do Terreno
RAM	Região Autónoma da Madeira
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
Uma	Universidade da Madeira

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

Os fenómenos naturais são cada vez mais frequentes por causa das alterações climáticas atmosféricas causadas pelo homem, as zonas urbanas representam o maior problema no que respeita a segurança da população.

A hidráulica é baseada na maioria dos casos na experimentação em laboratório, sendo este um apoio inerente e efetivo em prol da elaboração de projetos de obras de hidráulica (Figura 1). Esta experimentação leva aos modelos físicos que são boas aproximações, embora sem a devida precisão rigorosa, que permitem a objetividade prática. A caracterização do coeficiente de rugosidade ou do coeficiente de resistência ao escoamento têm ao longo dos últimos anos sido alvo de investigações aprofundadas, sendo amplamente investigada no que concerne ao escoamento em canais naturais.



Figura 1 - Canal Hidráulico.

No caso dos canais naturais adota-se um coeficiente de rugosidade, o que significa estimar a resistência do mesmo ao escoamento. Esta situação pode ser nefasta para o dimensionamento de obras hidráulicas.

Pretende-se, através de caracterização experimental e da aplicação de modelos numéricos aprofundar o conhecimento dos mecanismos envolvidos no escoamento em canais naturais bem como na interação entre as diferentes superfícies, desprezando o efeito do transporte sólido, (Pinto, 2010).

Os testes em modelos são uma boa aproximação, apesar de não se conseguir uma precisão rigorosa, porém consegue-se uma precisão necessária para os objetivos práticos. O problema da previsão da resistência ao escoamento tem atraído a atenção dos engenheiros há muito tempo, (Suárez, 2000).

Adoção de critérios práticos de avaliação do coeficiente de rugosidade significa estimar a resistência de este ao escoamento, a utilização de um valor incorreto pode ter grandes impactos na estimação do caudal de descarga e no dimensionamento de projetos.

Na Região Autónoma da Madeira (RAM), as zonas a montante das bacias hidrográficas, que possuem canais naturais, são as mais problemáticas, onde ocorrerem mais frequentemente deslizamentos de detritos que provocam entupimentos do canal, estrangulando assim o caudal transportado em relação a uma situação normal. No que consta aos canais naturais, existem vários aspetos condicionantes a ter em conta, entre os quais, topografia, declive, clima e litologia. A topografia tem a importância de determinar as áreas e o perímetro bem como a localização, orientação e variações do relevo e representá-las em cartas topográficas. O clima é um padrão dos diversos elementos atmosféricos (temperatura, precipitação, vento, humidade e pressão). A litologia designa a rocha formadora do solo ou material de origem do solo, logo as variações ao longo do tempo que as rochas sofrem são chamadas de variações litológicas.

1.2. Métodos de Desenvolvimento

Em primeiro lugar procede-se à recolha da informação bibliográfica disponível. Após a análise bibliográfica verificou-se que as variáveis principais são, escoamento, caudal e coeficiente de rugosidade.

Com recurso ao programa ArcGis e usando modelos digitais do terreno, é feita uma análise da bacia hidrográfica relativa ao caso de estudo (canal natural), a partir da qual obtivemos os dados referentes às características geométricas, de relevo e drenagem.

Proseguimos com a análise da precipitação, usando folhas de cálculo e os dados fornecidos, para adquirir os valores de precipitação e calcular o tempo de concentração das bacias, e os caudais necessários para a modelação.

Selecionar os troços importantes dos canais naturais em estudo e, usando os equipamentos disponíveis no Laboratório de Hidráulica da Universidade, folha de cálculo programada e o programa HEC-RAS, procede-se à simulação, modelação e análise dos tramos, comparando o resultado e o comportamento, com o expectável para os coeficientes de rugosidade.

A presente dissertação foi desenvolvida de acordo com o esquema apresentado na Figura 2, iniciada por uma recolha de informação bibliográfica, sobre a temática a ser abordada, seguido de uma análise visual às zonas em estudo, o tratamento e organização dos dados, através de mapas digitais do *software* ArcGis, de seguida a organização, tratamento e análise dos resultados obtidos, com o auxílio do *software* HEC-RAS e folhas de cálculo (Excel). No fim, foram expostas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido.



Figura 2 - Metodologia da dissertação.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, no primeiro capítulo, são apresentados os objetivos, os métodos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, é exposto o apoio teórico do trabalho, especialmente conceitos e teorias necessárias à interpretação e estudo de resultados.

No terceiro capítulo, caracteriza-se as áreas de estudo e o seu contexto na RAM, evidenciando a informação mais importante.

No quarto capítulo, primeiramente retrata-se o estudo da precipitação para determinação do caudal, continuando com a descrição dos modelos numéricos e do modelo reduzido, que inclui a descrição de instalações e equipamentos, bem como todo o procedimento experimental, para caracterização, modelação e simulação do escoamento, concluindo com a análise e discussão dos resultados.

No quinto capítulo, regista-se as principais apreciações finais retiradas no decorrer da dissertação e indicam-se as diversas hipóteses de desenvolvimento da investigação efetuada.

Em anexo, encontram-se de forma organizada toda a documentação necessária relativa à caracterização e formulação, criada no decorrer da dissertação.

CAPÍTULO 2

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. Bacia hidrográfica

Bacia hidrográfica de um curso de água, refere-se a área total, em que a precipitação que cai sobre essa área é encaminhada por escoamento, após o solo estar saturado, para uma secção comum de saída da mesma, chamada secção de referência, (Ferreira, 2010).

Se não for referida a secção em estudo, considera-se a totalidade da bacia hidrográfica, existindo também as sub-bacias que advem da divisão da bacia principal.

A quantidade de infiltração baixa se a precipitação não terminar e o escoamento superficial em direção ao curso de água é cada vez maior, sendo transportado de seguida até a secção de referência. O hidrograma consequente da secção incorpora, para além do escoamento superficial, a contribuição subterrânea, em regra desfasada no tempo, relativamente à momento da precipitação, (Mano, 2008).

A bacia hidrográfica é delimitada por linhas de fecho e de talvegue, as linhas de fecho junta os pontos com a cota mais elevada que separa a água escoada entre bacias, as linhas de talvegue pelo contrário, junta os pontos com a cota mais baixa, é a linha seguida pelos cursos de água. De seguida apresenta-se um exemplo de uma bacia hidrográfica (Figura 3).



Figura 3 - Bacia hidrográfica (Martucci, 2014)

2.1.1. Delimitação da bacia hidrográfica

Nos solos permeáveis, a presença de escoamentos subterrâneos torna o confinamento das bacias menos lineares. Nas ocasiões em que se verifique a existência no subsolo de formações vulcânicas, a linha de divisão de águas superficiais pode diferir consideravelmente da linha de divisão de águas subterrâneas, (Chow, 1964).

Nas bacias mais pequenas, é percentualmente significativo, a adição do escoamento de bacias adjacentes em consequência da não simultaneidade entre as linhas de divisão de águas (superficial e subterrânea), Nas bacias grandes, a relevância dos aumentos ou diminuições do escoamento resultantes é geralmente pequena.

A delimitação de bacias hidrográficas é feita com recurso somente à topografia dos terrenos, cada bacia é assim separada das restantes do ponto de vista topográfico. O método usado é, em primeiro defenir o ponto na parte mais baixa do trecho do curso de água, onde é feita a delimitação da bacia, depois reforçar a marcação dos cursos de água, começando na foz, conectar os pontos mais elevados, tendo como referência as curvas de nível e os pontos já cotados, (Lencastre & Franco, 2006). O limite da bacia circunda os cursos de água primários e secundários nunca podendo ser cruzados com estes (Figura 4).

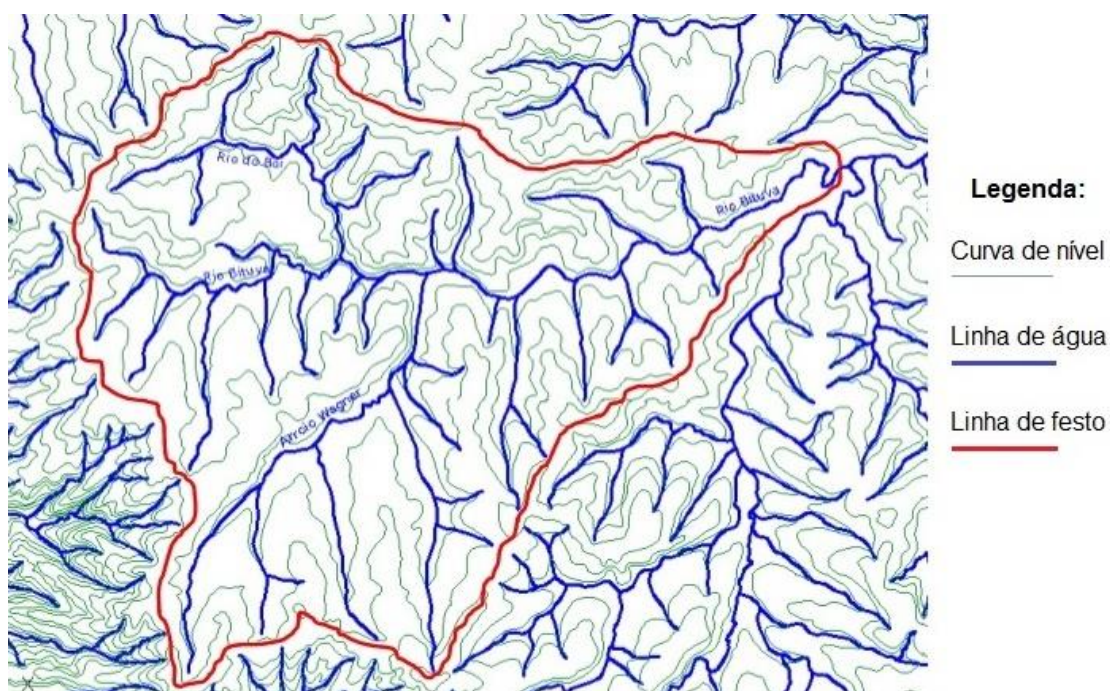


Figura 4 - Delimitação de uma bacia hidrográfica, adaptado de (Eduardo Paula, 2014).

2.1.2. Atributos fisiográficos da bacia hidrográfica

As características físicas de uma bacia hidrográfica, são elementos que conseguem ser isolados a partir de, fotografias aéreas, imagens de satélite ou cartas topográficas. É importante para comparar bacias hidrográficas, interpretar fenómenos passados e efectuar “antevisões” de descarga de um curso de água. É usado para caracterizar a bacia em marcos geométricos, comparativamente ao sistema de drenagem e relevo, também para aspetos condicionantes na disposição hidrológica da bacia, como, a constituição geológica, o tipo de solos presentes e coberto vegetal preponderante. Esta caracterização permite encontrar relações entre diferentes bacias hidrográficas e relacionar alguns parâmetros hidrológicos, (Mano, 2008).

2.1.2.1. Atributos geométricos

A área de drenagem (A) é a característica geométrica principal a considerar, esta resulta da projeção dimensional horizontal da bacia depois de definidos os respetivos perímetros. A área é expressa em km² ou hectares.

O formato das bacias hidrográficas caracteriza-se com a sua superior ou inferior propensão para a concentração do escoamento superficial em refutação à ocorrência das precipitações intensas. A planimetria da bacia pode exercer grande preponderância na regulação do curso de água, especialmente nos caudais de cheia.

Uma bacia elíptica ou alongada é constituída normalmente por uma linha de água principal, de grande evolução e pequena largura, acolhendo linhas de água secundárias de pequena relevância, desta maneira o escoamento é mais distribuído ao longo do tempo, gerando uma enchente menor.

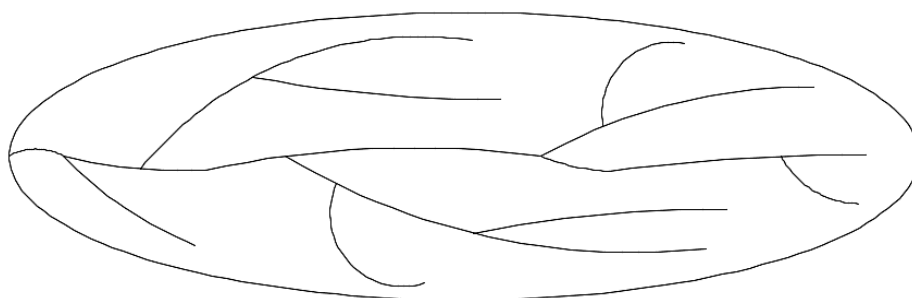


Figura 5 - Bacia elíptica ou alongada e as características do escoamento originado por uma precipitação uniforme, (Milani, 2014).

Uma bacia radial ou ramificada são formadas por várias sub-bacias fraccionárias alongadas que se convergem para a mesma linha de água antes da secção de controlo, assim a cheia varia com as contribuições das várias sub-bacias.

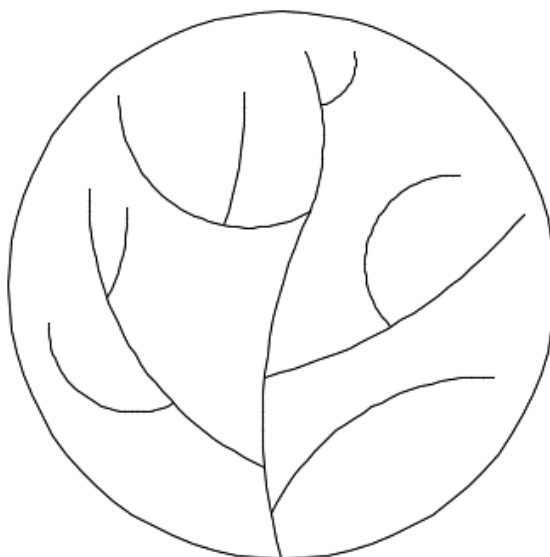


Figura 6 - Bacia circular ou arredondada e as características do escoamento originado por uma precipitação uniforme, (Milani, 2014).

Uma bacia radial ou ramificada são formadas por várias sub-bacias parciais alongadas que se convergem para a mesma linha de água antes da secção de referência, assim a cheia varia com as contribuições das várias sub-bacias.

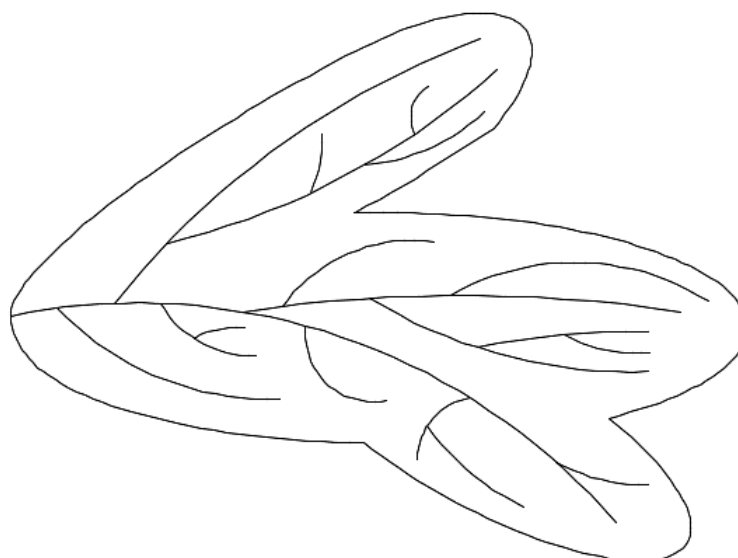


Figura 7 - Bacia radial ou ramificada e as características do escoamento originado por uma precipitação uniforme, (Milani, 2014).

O caudal de cheia em bacias elípticas e assegurando a igualdade de todas as diferentes condições, este será menor do que nas bacias mais arredondadas.

Em bacias circulares a convergência das águas é muito mais rápida, originando um caudal máximo de cheia maior, de inferior duração.

No sentido de classificar a forma das bacias, utilizam-se alguns critérios quantitativos:

- 1. Índice de compacidade (ou índice de Gravelius), K_c** - relação entre o perímetro da bacia (em km), P, e o perímetro de uma bacia com igual área (em km²), A, mas, com forma circular, P e A, são respetivamente a área e o perímetro da bacia circular, $A = \pi r^2$ e $P = 2\pi r$, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010), logo:

$$K_c = P/2\sqrt{\pi \times A} \quad (\text{eq. 1})$$

Este coeficiente é adimensional não depende o seu valor do tamanho da bacia. No ínfimo é igual à unidade ($K_c=1$) o que corresponde a uma bacia circular e tem tendência para apresentar caudais elevados. Os valores de K_c iguais ou menores a 1.13 traduzem, normalmente, bacias arredondadas.

- 2. Factor de alongamento, K_L** - observando um retângulo igual à bacia em estudo, este fator traduz a relação entre o comprimento, L_e , e a largura, l_e , do mesmo retângulo equivalente; a bacia é considerada alongada para valores maiores que 2, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010).

$$K_L = L_e/l_e \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo:

$$L_e = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,128} \cdot \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c}\right)^2} \right|$$

$$l_e = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,128} \cdot \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c}\right)^2} \right|$$

- 3. Factor de forma, K_f** - é a ligação entre a largura média, l , e o comprimento da bacia, L_b . A largura média da bacia é o quociente do comprimento da bacia e da sua área, A,

enquanto que, o comprimento da bacia, mede-se o curso de água mais longo desde montante até a secção de referência, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010), assim, K_f é:

$$K_f = I/L_b = A/L_b^2 \quad (\text{eq. 3})$$

Uma bacia com um baixo factor de forma está menos subordinada à ocorrência de cheias, do que outra de tamanho igual, mas com um maior factor de forma, a contribuição de cada afluente secundário chega ao curso de água principal e à secção de controlo, em tempos divergidos, moderando assim, os picos de escoamento. Valor máximo de K_f será de um (1), que corresponde a uma bacia quadrada.

2.1.2.2. Tipos de planos de drenagem

Existem três grandes categorias para classificar os cursos de água, tendo como base o seu regime de escoamento, Figura 8:

Cursos de água **perenes** referem-se a cursos contêm água todo o ano, o escoamento é conservado graças às reservas subterrâneas, mantendo uma alimentação contínua, nunca decendo abaixo do leito do curso de água, mesmo quando existe secas severas.

Cursos de água **intermitentes** são cursos que escoam a água durante a estação húmida, mas que terminam por secar na estiagem:

- Durante a época de chuvas, o nível freático ascende acima do nível do leito do canal, criando escoamento;
- Na época seca, o nível freático reduz para baixo do nível do leito do canal, cessando assim o escoamento. Pode acontecer escoamento apenas em consequência de precipitação pontual.

Cursos de água **efémeros** transportam apenas escoamento superficial, após um evento de precipitação. A superfície freática encontra-se a um nível inferior ao leito do canal não havendo possibilidade de escoamento subterrâneo, porque as ascensões do nível freático nunca afectam o leito do canal.

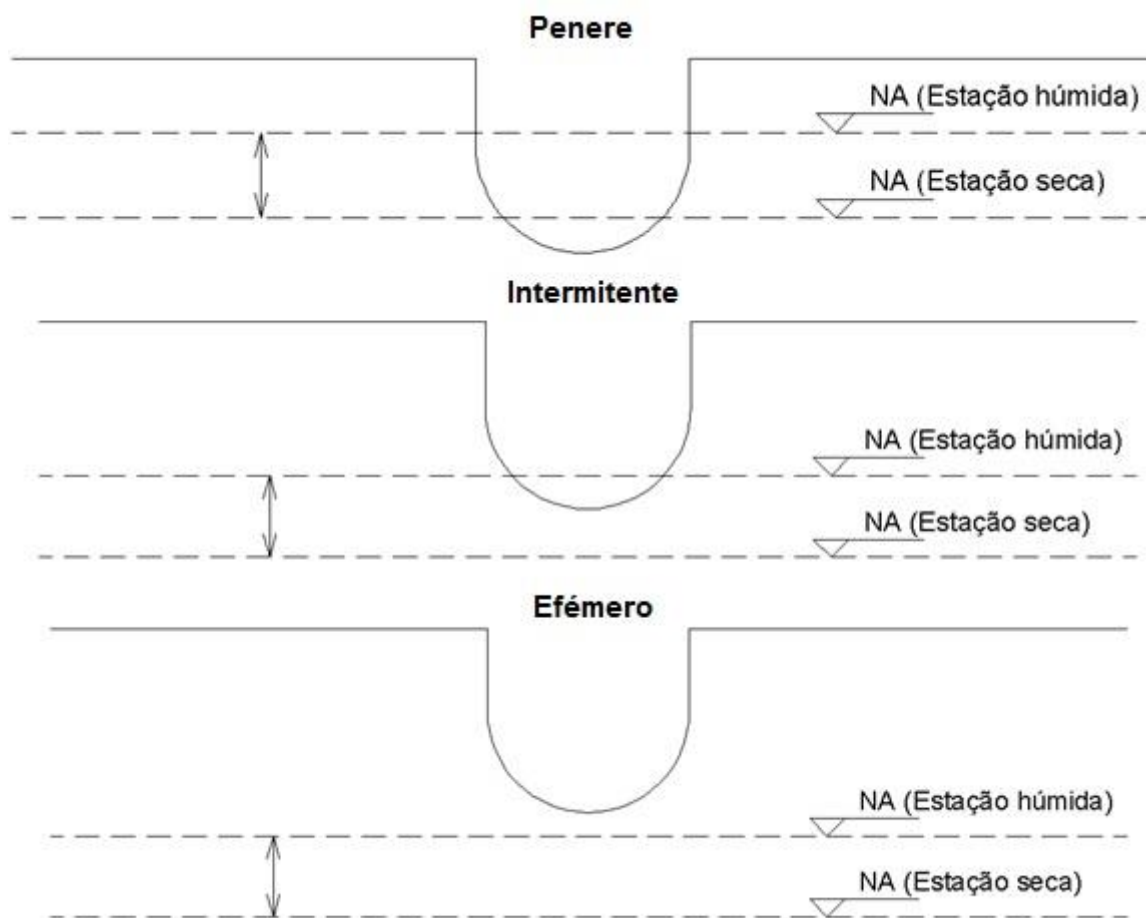


Figura 8 - Categorias dos cursos de água, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010).

Classificação dos cursos de água

O estudo das ramificações e desenvolvimento dos cursos de água pertencentes a uma bacia hidrográfica, é importante pois indica a velocidade de escoamento com que a água deixa a bacia. É necessário estabelecer classificações que indiquem o grau de ramificação ou bifurcação. Existem dois métodos mais utilizados, que são:

1. Método de Strahler

Os cursos de água são classificados de acordo com um grau de ramificação presente no interior de uma bacia hidrográfica. Segundo a classificação de Strahler observa-se que, os cursos de água sem ramificações são de 1ª ordem e que quando dois cursos de água da idêntica ordem confluem, a ordem sobe 1 grau, senão, impera a maior ordem, (Ferreira, 2010).

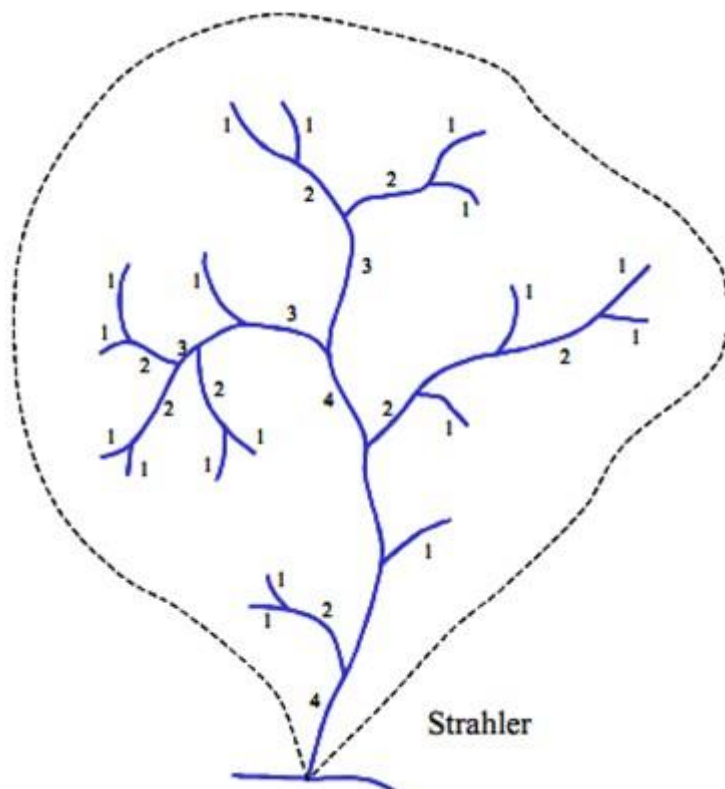


Figura 9 - Método de Strahler, (Fragoso, 2014).

A razão da bifurcação (R_b) é explicada como a divisão entre o número de canais de uma dada ordem (N_i) e o número de canais de ordem seguidamente superior (N_{i+1}) e varia, normalmente, entre 2 e 4.

$$R_b = N_i / N_{i+1} \quad (\text{eq. 4})$$

E assim uma facultada bacia de ordem i , $i-1$ os valores de R_b podem ser determinados, conforme se demonstra na seguinte tabela:

Tabela 1 - Razão da bifurcação.

Ordem, i	N_i	R_b
1	10	2.5
2	4	2.0
3	2	2.0
4	1	-
-	$\bar{R}_b =$	2.2

O valor médio dos R_b 's individuais da bacia mostra a razão de bifurcação média para a bacia.

$$\overline{R_b} = \sqrt[i-1]{\prod_{i=1}^{i-1} \frac{N_i}{N_{i+1}}} = \sqrt[i-1]{N_1} \quad (\text{eq. 5})$$

2. Método de Shreve

Este método de Shreve é muito semelhante ao de Strahler, mas difere no aspeto em que as magnitudes são adicionadas todas as vezes que há uma união de dois canais de água. Por exemplo, quando 2 canais de 2.º grau se unem, o canal a jusante recebe é classificado com o 4.º grau, (Ferreira, 2010). A Figura 10 mostra o método Shreve sobre a malha de drenagem de uma bacia.

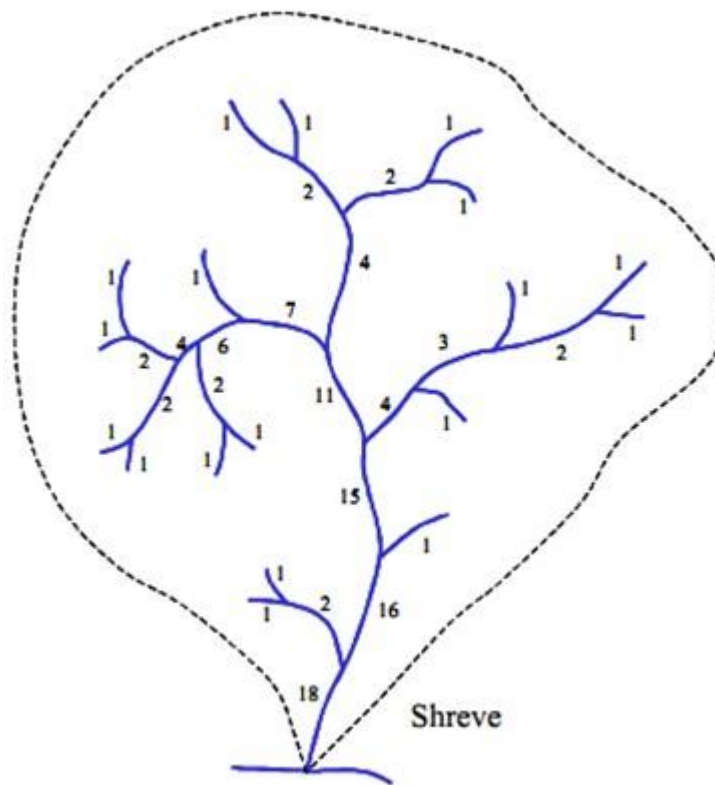


Figura 10 - Método de Shreve, (Fragoso, 2014).

Tempo de concentração

O tempo de concentração de uma determinada bacia, t_c , é o tempo preciso para que a sua área ajude o escoamento superficial na secção de referência, também é considerado como o tempo fundamental para que uma gota de água que cai no ponto mais afastado da bacia

chegue à secção de controlo, é uma característica constante da bacia, independente da precipitação.

Temos de saber o tempo de concentração de uma bacia, porque para chuvas que tem duração inferior ao tempo de concertação estas vão chegar a secção de referencia depois, do que a chuva que cai numa secção mais próxima desta. Para chuvas com duração superiores ou iguais ao tempo de concertação, a precipitação que cai mais distante da foz vai juntar-se a que caiu mais próximo da mesma, deste modo ocorre uma cheia maior do que uma com precipitação mais curta.

Existem diversas expressões para definir o tempo de concentração de uma definida secção da bacia, sendo elas apresentadas de seguida.

- **Témez**

Témez (1978), investigou bacias espanholas e recomendou a utilização para uma dada secção de uma bacia natural com área ate 3000 km² a seguinte fórmula:

$$t_c = 0,3 \times (L/i^{0.25})^{0.76} \quad (\text{eq. 6})$$

Sendo:

t_c - tempo de concentração (h);

L - comprimento curso de água principal (km);

i - declive médio curso de água principal (m/m).

- **Ven Te Chow**

Esta fórmula é usada em bacias de área delimitada entre os 1,1 e os 19 km², (Silveira, 2005).

$$t_c = 0.8773 \times (L/\sqrt{i})^{0.64} \quad (\text{eq. 7})$$

Sendo:

t_c - tempo de concentração (h);

L - comprimento maior linha de água (km);

i - inclinação média curso de água principal (m/km);

- **Bransby Willians**

Esta fórmula é recomendada para utilização em bacias rurais, (Lencastre & Franco, 2006).

$$t_c = 0.605 \times \frac{L}{(i^{0,2} \times A^{0,1})} \quad (\text{eq. 8})$$

Sendo:

t_c - tempo de concentração (h);

L - comprimento maior linha de água (km);

i - inclinação média curso de água principal (%);

A - área da bacia (km²)

- **Giandotti**

Fórmula derivada a partir de dados em bacias hidrográficas italianas, para aplicação em grandes bacias naturais, (Silveira, 2005).

$$t_c = \frac{(4 \times \sqrt{A}) + (1.5 \times L)}{0.8 \times \sqrt{\bar{H}}} \quad (\text{eq. 9})$$

Sendo:

t_c - tempo de concentração (h);

A - área da bacia (km²);

L - comprimento maior linha de água (km);

\bar{H} - altura média da bacia (m).

- **Tempo de concentração médio**

A fórmula do tempo de concentração médio não é nada mais que a média de todos os montantes para o tempo e concentração obtidos nas fórmulas citadas anteriormente:

$$\bar{t}_c = \frac{\sum t_{c,i}}{n} \quad (\text{eq. 10})$$

Densidade de drenagem

A densidade de drenagem, D_d , serve para determinar a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica e qualificar a sua extensão, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010). Para efetuar essa classificação, utilizamos a seguinte fórmula.

$$D_d = L_t/A \quad (\text{eq. 11})$$

Sendo:

L_t - comprimento dos cursos de água (km);

A - área total da bacia (km²).

Os valores da densidade de drenagem alteram entre 0.5 e 3.5 km/km², para os vários tipos de bacias existentes, apresentadas na seguinte tabela.

Tabela 2 - Densidade de drenagem.

Tipos de bacias	Densidade de drenagem
Drenagem pobre	$D_d < 0,5 \text{ km/km}^2$
Drenagem regular	$0,5 \leq D_d < 1,5 \text{ km/km}^2$
Drenagem boa	$1,5 \leq D_d < 2,5 \text{ km/km}^2$
Drenagem muito boa	$2,5 \leq D_d < 3,5 \text{ km/km}^2$
Excepcionalmente bem drenadas	$D_d \geq 3,5 \text{ km/km}^2$

Densidade hídrica

Densidade hídrica, D_h , é o índice que relaciona o número de linhas de água presentes na bacia, com a área da mesma.

$$D_h = N/A \quad (\text{eq. 12})$$

Sendo:

N - número total de linhas de água.

A - área da bacia (km²).

Percurso médio do escoamento superficial

Percurso médio do escoamento superficial, \bar{P}_s , numa bacia, é a distância média, medida em km, que a água da chuva tem que transitar até atingir o curso de água mais adjacente, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010). O valor é sensivelmente um quarto do inverso da densidade de drenagem:

$$\bar{P}_s = A/4L_t \approx 1/4D_d \quad (\text{eq. 13})$$

Sendo:

L_t - comprimento dos cursos de água (km);

A - área total da bacia (km²).

Sinuosidade do curso de água

A sinuosidade de um curso de água, S, é a correspondência entre a distância do canal principal, e a distância do talvegue. Trata-se de uma característica controlada pela velocidade do canal. (Ferreira, 2010) Quando o valor tende para a unidade, o canal tem um traçado retilíneo.

$$S = L/L_t \quad (\text{eq. 14})$$

Sendo:

L - comprimento do canal principal (m).

L_t - comprimento do talvegue (m).

2.1.2.3. Atributos do relevo

As principais características de relevo de uma bacia têm muita relevância sobre os fatores meteorológicos e hidricos, pois a velocidade do escoamento superficial dependdo terreno.

A temperatura, precipitação e evaporação são valores oscilantes em função da altura da bacia hidrográfica.

Curva Hipsométrica

É uma representação gráfica do relevo médio da bacia hidrográfica, passa pela designação das áreas por classes de alturas, estabelecendo, assim, a distribuição das constâncias altimétricas.

O método utilizado para fazer caracterização gráfica é representar a área da bacia em função da altura da mesma, dando origem a curva hipsométrica da bacia hidrográfica, exemplo na Figura 11.

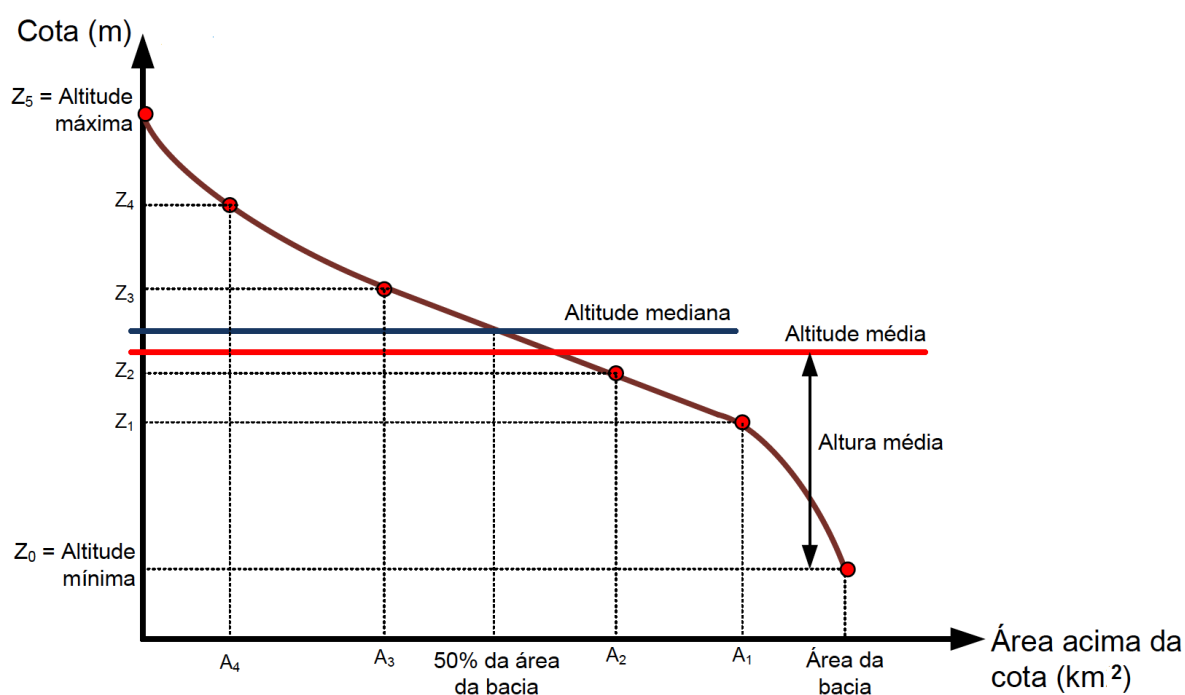


Figura 11 - Curva hipsométrica, (Lima, 2009).

Com meio à cartografia digital e às ferramentas ligadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a análise da hipsometria dos terrenos passou a ser mais fácil devido à presença de cartografia hipsométrica.

A título de exemplo temos na Figura 12 o mapa hipsométrico de duas bacias hidrográficas da região, alcançado a partir de um mapa topográfico.

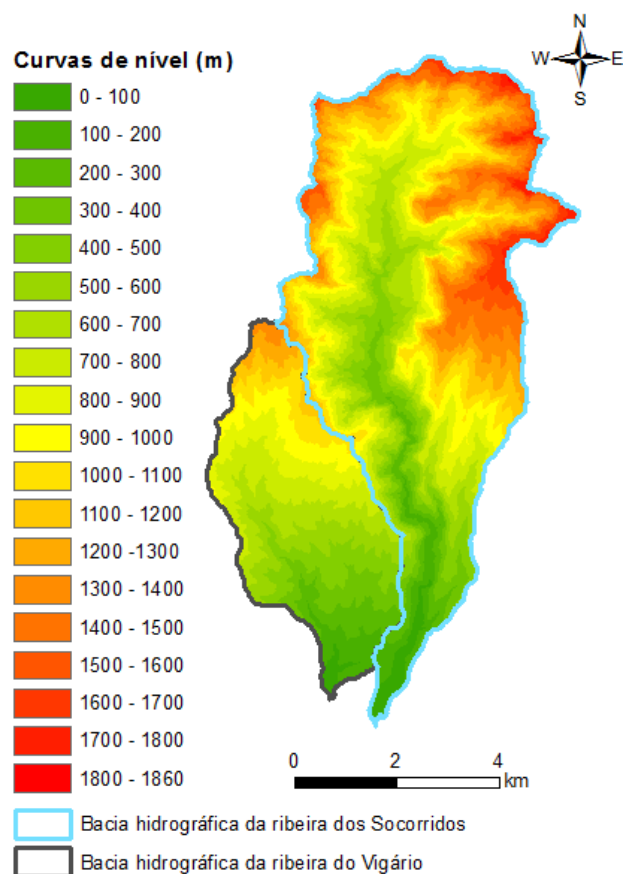


Figura 12 - Mapa hipsométrico de uma bacia, (Lousada, 2014).

Altitude e altura média

A altitude media, em metros, pode ser obtida através da seguinte fórmula.

$$\bar{Z} = \frac{\sum \bar{Z}_i \times A_i}{A} \quad (\text{eq. 15})$$

Sendo:

\bar{Z}_i - altitude média de duas curvas de nível sucessivas.

A_i - área respectiva das curvas de nível (km²).

A - área total da bacia (km²).

Da mesma configuração define-se a altura média, \bar{H} , considerando a referência de origem das alturas, a cota da secção de referência da bacia, Z_{min} . Assim temos:

$$\bar{H} = \frac{\sum \bar{H}_i \times A_i}{A} = \bar{Z} - Z_{min} \quad (\text{eq. 16})$$

Perfil longitudinal de um canal

O perfil longitudinal de um canal refere, em cada ponto, as alturas do seu leito com a distância do ponto à secção. A velocidade de um escoamento depende da declividade do canal, é preciso conhecer a declividade do mesmo para saber a importância no estudo do escoamento, quanto maior a declividade maior será a velocidade.

Pode ser obtido através dos mapas topográficos desde que exponham curvas de nível suficientes para conseguir uma boa configuração do terreno. Cartas topográficas com uma equidistância de curvas de nível de 10 m, já nos oferecem um bom perfil longitudinal. Na figura seguinte temos um exemplo de um perfil longitudinal.

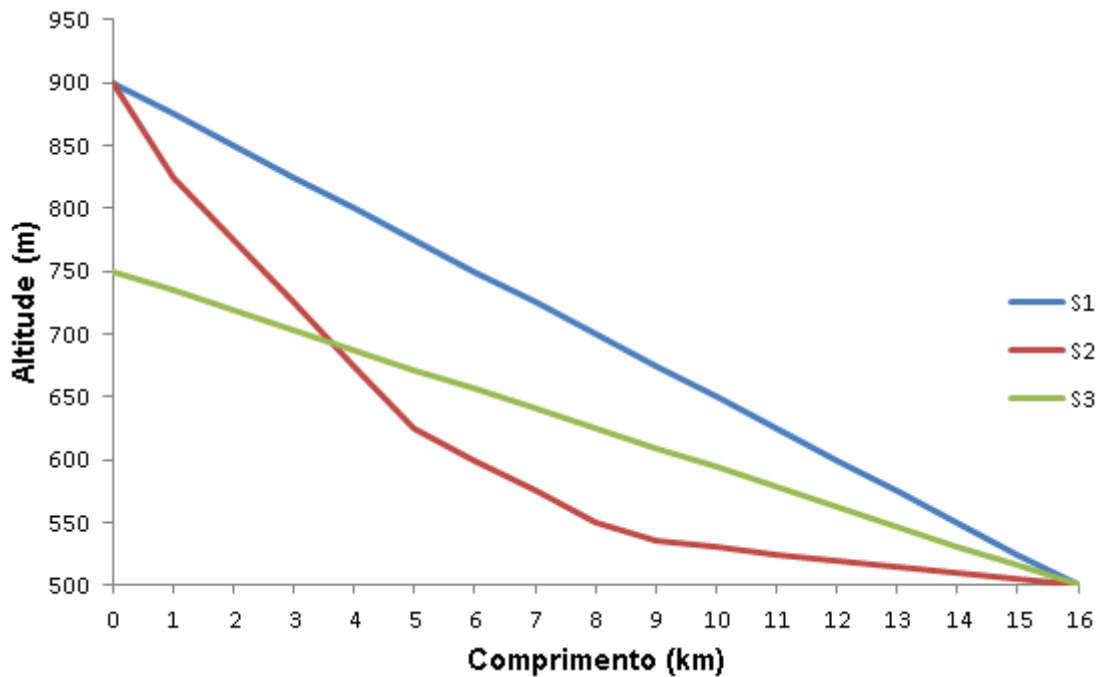


Figura 13 - Perfil longitudinal de um canal, (Lima, 2009).

$$S_3 = \left(\frac{\sum L_i}{\sum L_i / S_i} \right) \quad (\text{eq. 17})$$

Sendo:

S1 - declividade máxima;

S2 - declividade média;

S3 - declividade equivalente constante:

Declive médio do curso de água

Este valor é alcançado com a diferença de altitudes, ΔZ , em metros, entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do curso de água primário e o comprimento total, L:

$$D_m = \frac{\Delta z}{1000 \times L} \quad (\text{eq. 18})$$

Sendo:

ΔZ - diferença de altitudes máxima e mínima do curso de água;

L - comprimento da diferença de alturas do curso de água (km).

Índice de relevo

Este índice tem muita influência na velocidade de escoamento, funciona como indicativo de inclinação, quanto superior o valor, mais rápido a água chega a secção de referência.

$$i_{relevo} = \frac{\Delta z}{1000 \times L_b} \quad (\text{eq. 19})$$

Sendo:

ΔZ - diferença de altitudes máxima e mínima da bacia;

L_b - comprimento da diferença de alturas da bacia (km).

Padrão de drenagem

Os padrões de drenagem são uma arrumação planimétrica dos cursos de água, concedendo origem a vários esquemas distintos uns dos outros, que é influenciado pela natureza e organização das camadas rochosas, pela geomorfologia da região e pelas disparidades de declive. Os importantes padrões de drenagem são ver (Figura 14):

1. **drenagem dendrítica** - são ramificações irregulares dos cursos de água assemelhando-se a uma árvore. Desenvolvem-se em rochas de resistência uniforme;
2. **drenagem em treliça** - especifica por ter canais principais, que correm paralelamente entre si, e por canais secundários paralelos entre si, que afluem perpendicularmente nos primeiros;

3. **drenagem retangular** - são caracterizadas por muitas curvas de angulo reto, é diferente do modelo de treliça, são consequência da efeito de falhas e pelo sistema de fraturas com angulo reto;
4. **drenagem radial** - os canais de água encontram-se dispostos circularmente como os raios de uma roda, em ligação a um ponto central. São típicas de origem vulcânica;
5. **drenagem anular** - são contituidos por forma circular e parecem anéis de aparência igual aos que surgem no tronco de uma árvore;
6. **drenagem em paralelo** - é um conjunto de canais de água paralelos uns aos outros. Deve-se a existência de declives acentuados. ou onde existam cristas estruturais alongadas.

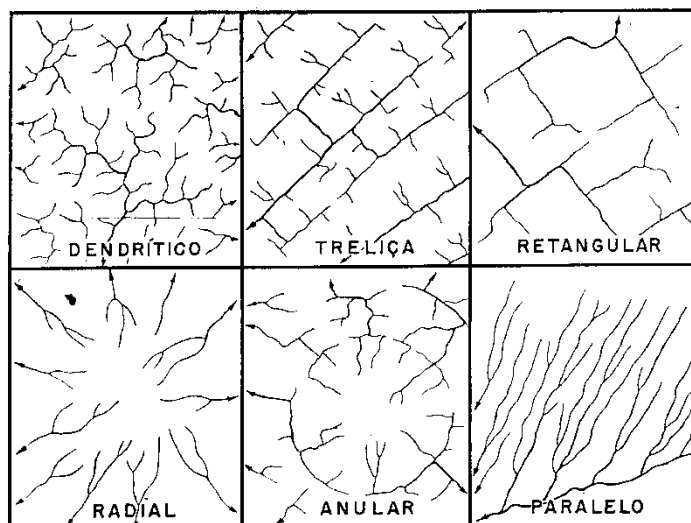


Figura 14 - Exemplos de drenagem, (Soares, 2013).

2.1.2.4. Geologia, solos e coberto vegetal

Os atributos geológicos de uma bacia hidrográfica regulam fortemente o sistema da rede de drenagem da mesma, através do tipo de solo actual e a distribuição do coberto vegetal actual.

O escoamento da bacia, é mais persistente quanto melhor a permeabilidade dos solos e constituições geológicas, porque favorece o armazenamento de água nos aquíferos, mas pelo contrário mais desigual, quando a permeabilidade é mínima. A capacidade de infiltração e de retenção dos solos condicionam bastante o movimento das águas na bacia. Em analogia ao coberto vegetal da bacia e ao uso de ocupação do solo, estes regulam fortemente o escoamento e a infiltração, sendo importantes no estudo do comportamento hidrológico das bacias.

De seguida são apresentadas, como exemplo, a carta de solos e a carta geológica adaptadas à bacia hidrográfica de Machico. Em anexo é exibida a carta de usos e ocupação do solo da ilha da Madeira, (Figura 72).

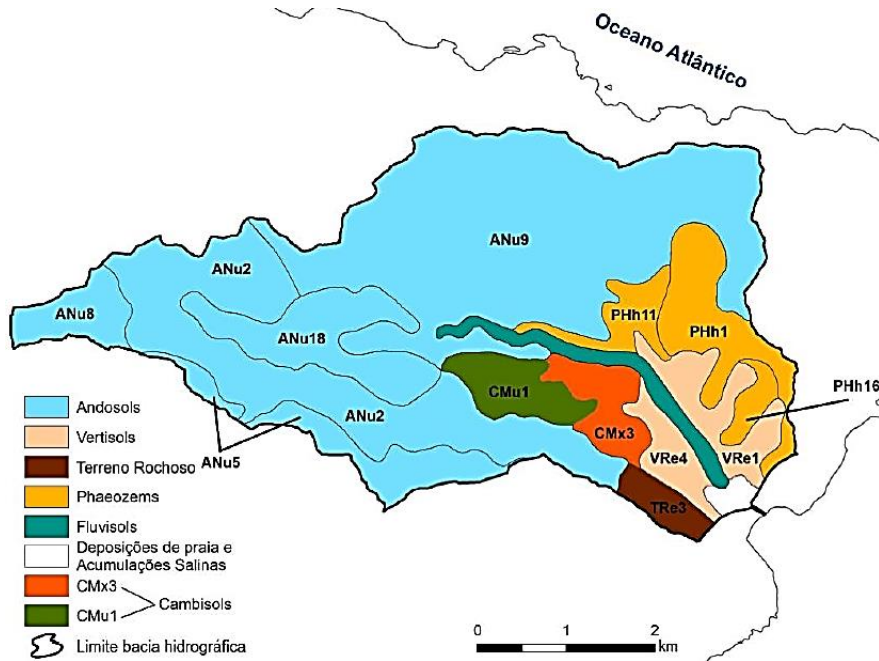


Figura 15 - Carta de solos de Machico 1992.

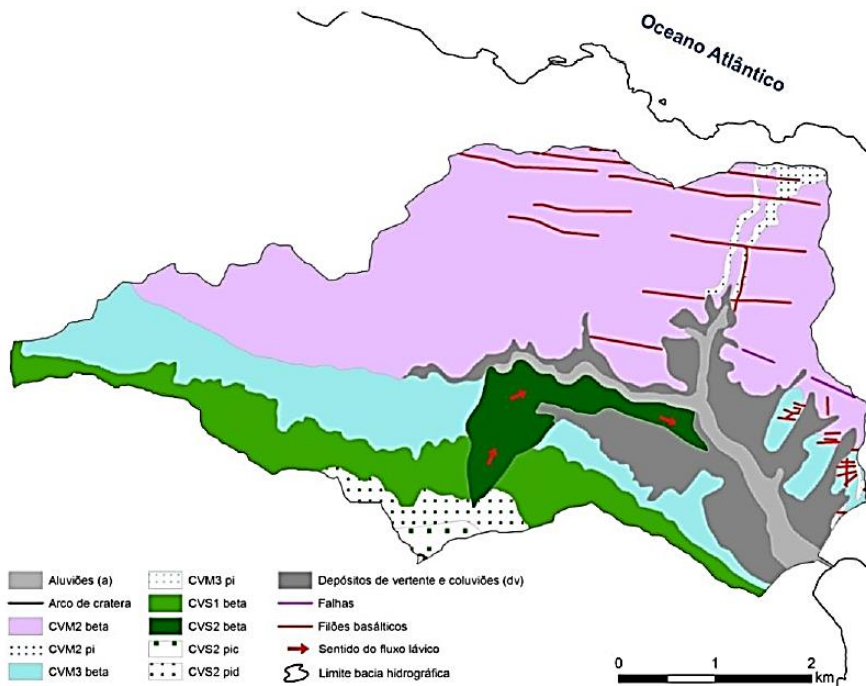


Figura 16 - Carta geológica de Machico 2010, (Prada, 2013).

2.2. Tipos e regimes de escoamento

Existem vários tipos e regimes de escoamentos que podem ser caracterizados de várias maneiras, na figura seguinte encontra-se um esquema que ilustra os diversos aspectos segundo, (Fernandes, 2008).

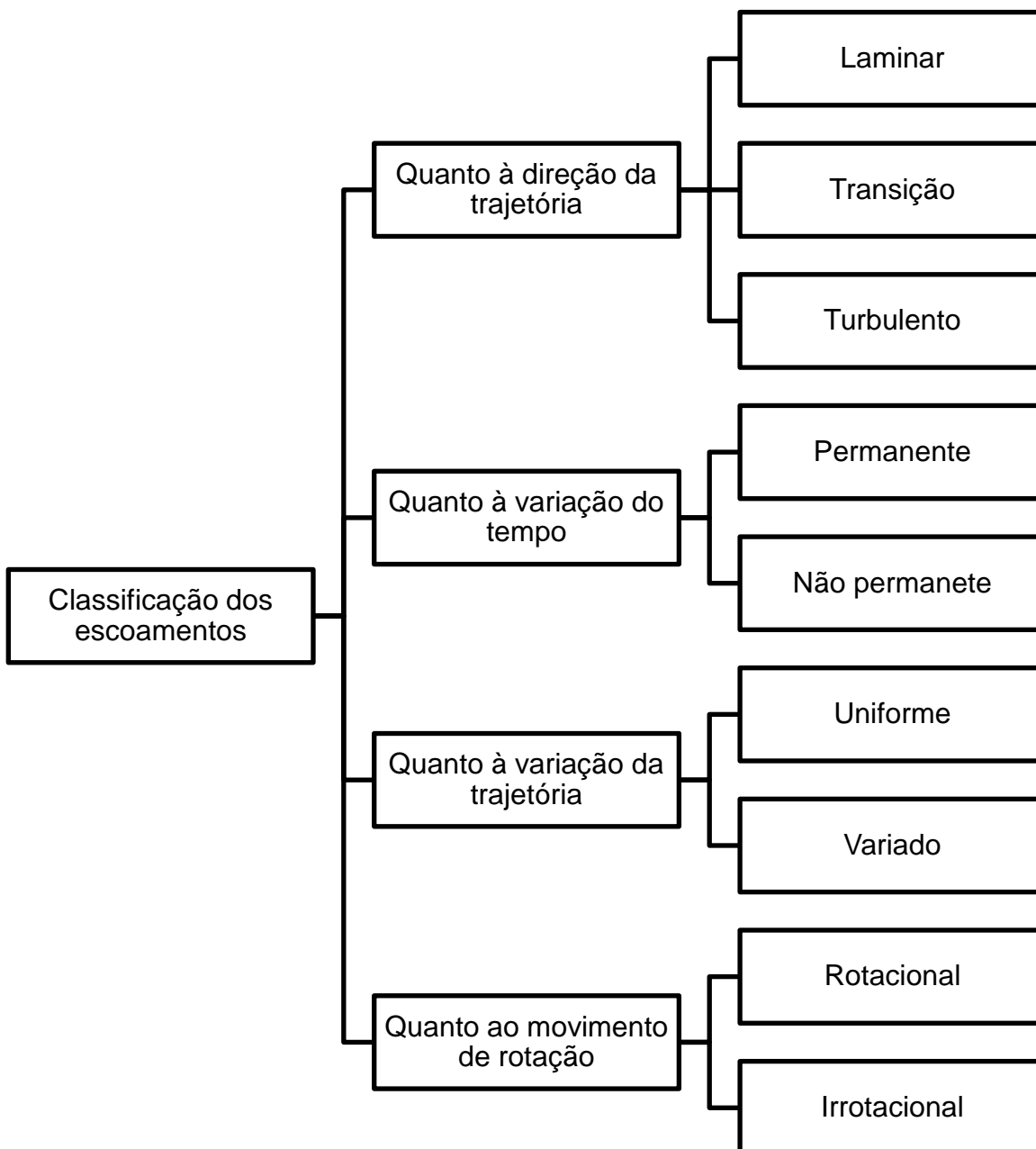


Figura 17 - Classificação dos escoamentos, adaptado de (Fernandes, 2008).

2.2.1. Direção da trajetória

O escoamento pode ser considerado como:

- a) **Laminar** - existe quando as partículas do fluido se movem ao longo de trajetórias definidas, apresentando lâminas ou camadas, a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência, aparece em fluidos que apresentam grande viscosidade e em baixas velocidades;
- b) **Transição** - significa a mudança do escoamento de laminar para turbulento e vice-versa;
- c) **Turbulento** - existe quando as partículas do fluido não se movem ao longo de trajetórias definidas, descrevem trajetórias irregulares, ocorre em fluidos com viscosidade baixa.

Para determinar se o escoamento é laminar, transição ou turbulento usamos o coeficiente de Reynolds, R_e , que ilustra rigorosamente, a importância das forças da viscosidade na geração de um fluxo num canal, e é dado pela seguinte equação:

$$R_e = u \times R_h / \nu \quad (\text{eq. 20})$$

Sendo:

u - velocidade característica (m/s);

R_h - raio hidráulico (m), relação entre a área da secção molhada (A , m²) e o perímetro molhado da mesma (P , m);

ν - viscosidade cinemática do fluido, (m²/s).

Assim classificamos o escoamento como:

- a) **Escoamento laminar** - se $R_e < 500$;
- b) **Escoamento de transição** - se $500 < R_e < 2000$;
- c) **Escoamento turbulento** - se $R_e > 2000$.

Outro factor inerente é o número de Froude, F_r , que é um número adimensional utilizado em escoamentos de superfície livre, representa a relação entre uma velocidade característica e a velocidade gravitacional, faz a separação dos tipos de regime de escoamento em três tipos, de acordo com sua ligação com o nível crítico da água no canal utilizando a seguinte equação:

$$F_r = u/\sqrt{g \times h} \quad (\text{eq. 21})$$

Sendo:

u - velocidade característica (m/s);

g - aceleração gravítica (m/s²);

h - profundidade hidráulica (m), resulta da equação $h=A/B$ (A , a área da secção transversal, m², B , largura da superfície livre, (m);

Assim classificamos o escoamento como:

- a) **Escoamento fluvial** (lento) - se $F_r < 1$;
- b) **Escoamento torrencial** (rápido) - se $F_r > 1$;
- c) **Escoamento crítico** - se $F_r = 1$.

Relacionando as duas combinações dos valores de Froude e Reynolds resultam os subsequentes quatro regimes de escoamento:

- a) **Fluvial/Laminar** - $F_r < 1$ e $Re < 500$;
- b) **Fluvial/Turbulento** - $F_r < 1$ e $Re > 2000$;
- c) **Torrencial/Laminar** - $F_r > 1$ e $Re < 500$;
- d) **Torrencial/Turbulento** - $F_r > 1$ e $Re > 2000$.

2.2.2. Variação no tempo

O escoamento pode ser considerado como:

- a) **Permanente** - todas as propriedades e grandezas que caracterizam o escoamento são constantes ao longo do tempo (velocidade média e seção). O caudal pode ser definido segundo a seguinte equação.

$$Q = \bar{u} \times S \quad (\text{eq. 22})$$

Sendo:

\bar{u} - velocidade média (m/s);

S - área da seção (m²).

- b) **Não permanente** - quando pelo menos um dos parâmetros do escoamento variam com o tempo. Nestas conjunturas, o caudal para de ser constante.

2.2.3. Variação da trajetória

O escoamento pode ser considerado como:

- a) **Uniforme** - todos os pontos na mesma trajetória têm a mesma velocidade, secção constante, linhas de fundo e de superfície livre são paralelas;
- b) **Variado** - se a profundidade e os remanescentes parâmetros variarem de secção. O escoamento variado pode ser permanente ou não permanente.

2.2.4. Movimento de rotação

O escoamento pode ser como:

- a) **Rotacional** - neste caso as partículas movimentam-se de forma activa com velocidade angular em torno do seu centro de massa, originando um movimento de rotação;
- b) **Irrotacional** - neste caso as partículas movimentam-se linearmente sem apresentar um movimento de rotação aparente.

2.2.5. Tipos de aluviões

Os principais tipos de aluviões considerados são:

- a) **Escoamento estratificado (sheet flow)** - é o transporte sólido de material grosseiro junto ao fundo do leito do canal, por arrastamento, a camda superior do escoamento é composta por água limpa ou por uma mistura de água e de sedimentos finos, transportados em suspensão;
- b) **Escoamento de frente abrupta (debris flow)** - são movimentos rápidos e de alta energia nos quais fragmentos, escoam encosta abaixo em conjunto com restos vegetais, com energia e poder destrutivo muito elevados, o material mais grosseiro é transportado na frente da onda.

2.3. Caracterização da secção transversal

É muito importante conhecer a secção transversal nos canais naturais pois os diferentes tipos dos elementos geométricos devem ter relações definidas com os elementos hidráulicos. A caracterização é referente a uma secção transversal natural, secção calculada nesta dissertação.

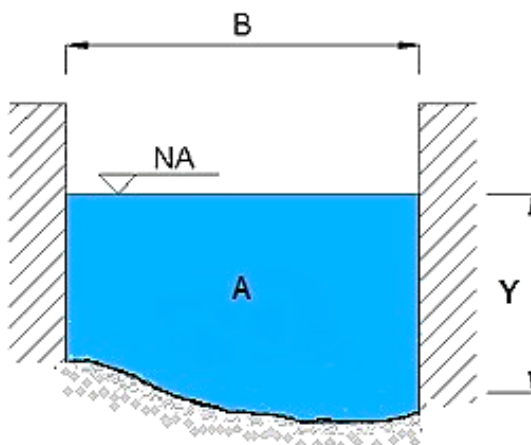


Figura 18 - Canal natural.

Características da secção transversal:

- **Y** - profundidade entre o ponto inferior da seção do canal e a superfície livre do fluido;
- **Y_m** - profundidade média;
- **B** - largura entre a margem esquerda e direita do canal;
- **A** - área da seção transversal;
- **P** - perímetro molhado é o comprimento da linha de limite da área molhada;
- **R_H** - raio hidráulico é correspondência entre área molhada e perímetro molhado ($R_H=A/P$).

2.4. Caudal de ponta de cheia

2.4.1. Apreciações gerais

O caudal de ponta cheia é o caudal instatâneo máximo para uma situação de cheia, serve para assegurar que o risco de galgamento de uma infra-estrutura ou de inundação de áreas ribeirinhas é admissível, (Martins F. J., 2000).

Este caudal depende muito de diversas características associadas à bacia hidrográfica, sendo as principais estas:

- Área da bacia hidrográfica;
- Precipitação;
- Rede de drenagem da bacia;
- Forma da bacia;
- Tipo de solo existstente.

Em seguida são apresentadas algumas fórmulas para calcular o caudal ponta de cheia, mas nem todas serão usadas nesta dissertação, por questões de limitação da área da bacia e do tempo de concentração para as quais umas produzem melhores resultados.

2.4.1.1. Fórmulas empíricas

Este tipo de utilização para a determinação de cheias inesperadas, não é a preferentemente recomendada por não associar aos resultados uma probabilidade de ocorrência. Pode ser usada quando não se dispõe de informação hidrométrica suficiente, (Lencastre & Franco, 2006). Exemplos de fórmulas empíricas utilizadas mais à frente no (subcapítulo 4.1.2. Análise probabilística).

Fórmula de Forti

Esta fórmula é usada para bacias hidrográficas cuja área seja menor a 1000 km², (Ferreira, 2010).

$$Q_p = A_b \cdot \left(b \cdot \frac{500}{A_b + 125} + c \right) \quad (\text{eq. 23})$$

Sendo:

A_b - área da bacia (km²);

b , c - constantes que tomam, os valores de 2,35 e 0,5 para precipitação máxima diária inferior que 200 mm, e os valores de 3,25 e 1,00 para precipitação máxima diária entendida entre 200 mm e 400 mm, respetivamente.

Fórmula de Iskowski

Esta fórmula é usada para bacias hidrográficas cuja área seja menor a 1000 km², (Martins F. J., 2000).

$$Q_p = K_{Is} \cdot m_I \cdot \bar{P} \cdot A_b \quad (\text{eq. 24})$$

Sendo:

K_{Is} - coeficiente irregular entre 0.800 e 0.017, depende da categoria dos solos, da cobertura vegetal e relevo (Tabela 3);

m_i - coeficiente variável com a área da bacia (Tabela 4);

\bar{P} - precipitação média anual (m);

A_b - área da bacia (km²).

Tabela 3 - Coeficiente K_{Is} , (Lencastre & Franco, 2006).

Orografia da bacia	Valores do coeficiente K_{Is}			
	Categoria I	Categoria II	Categoria III	Categoria IV
Baixa e pantanosa	0.017	0.030	-	-
Levemente ondulada	0.025	0.040	-	-
Plana e colinas	0.030	0.055	0.100	-
Colinas não muito íngremes	0.035	0.070	0.125	-
Montes altos / pouco inclinados	0.060	0.160	0.360	0.600
Montes altos / média inclinação	0.070	0.185	0.460	0.700
Montes altos / muito inclinados	0.080	0.210	0.600	0.800
Nota:				
Categoria I - Terreno bastante permeável com elevada vegetação ou totalmente cultivado;				
Categoria II - Terreno de colina ou montanha com vegetação normal, mas pouco permeável;				
Categoria III - Terreno impermeável com vegetação normal em colina escarpada ou montanhosa;				
Categoria IV - Terreno impermeável com nenhuma vegetação.				

Tabela 4 - Coeficiente m_i , (Lencastre & Franco, 2006).

A_b (km ²)	1	10	40	70	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
m_i	10.0	9.0	8.23	7.60	7.40	6.87	6.55	6.22	5.90	5.60	5.35	5.12	4.90	4.70

Fórmula de Pagliaro

Esta fórmula é usada para bacias hidrográficas cuja área seja menor a 1000 km², (Martins F. J., 2000).

$$Q_p = A_b \cdot \left(\frac{2900}{90 + A_b} \right) \quad (\text{eq. 25})$$

Sendo:

A_b - área da bacia (km^2).

Fórmula de Whistler

Esta fórmula é usada para bacias hidrográficas que possuam áreas abrangidas entre ao 1000 e os 12000 km^2 , (Martins F. J., 2000).

$$Q_p = A_b \cdot \left(\frac{1538}{259 + A_b} + 0,054 \right) \quad (\text{eq. 26})$$

Sendo:

A_b - área da bacia (km^2).

2.4.1.2. Fórmulas cinemáticas

Fórmula racional

Fórmula mais utilizada a nível mundial, apresenta resultados admissíveis e seguros, requer o conhecimento da área e tipo de ocupação do solo da bacia, da linha de possibilicada udométrica (LPU) e do tempo de concentração, (Martins F. J., 2000).

É usada em Portugal em bacias hidrográficas com áreas menores a 25 km^2 com obtenção de resultados stisfatorios.

$$Q_p = C \cdot I \cdot A_b \quad (\text{eq. 27})$$

Sendo:

C - coeficiente, depende do tipo e ocupação do solo da bacia hidrográfica (Tabela 5 e Tabela 6);

I - intensidade média de precipitação de uma bacia (mm/h);

A_b - área da bacia (km^2).

Tabela 5 - Valores do coeficiente de escoamento, (Chow, 1964).

Áreas Urbanizadas	
Ocupação do solo	C
Zonas verdes:	
relvados em solos arenosos	0.05 - 0.20
relvados em solos pesados	0.15 - 0.35
parques e cemitérios	0.10 - 0.35
campos desportivos	0.20 - 0.35
Zonas comerciais:	
centro da cidade	0.70 - 0.95
Periferia	0.50 - 0.70
Zonas residenciais:	
vivendas no centro da cidade	0.30 - 0.50
vivendas na periferia	0.25 - 0.40
prédios de apartamentos	0.50 - 0.70
Zonas industriais:	
indústria dispersa	0.50 - 0.80
indústria concentrada	0.60 - 0.90
Vias férreas	0.20 - 0.40
Ruas e estradas:	
asfaltadas	0.70 - 0.90
de betão	0.80 - 0.95
de tijolo	0.70 - 0.85
Passeios	0.85 - 0.85
Telhados	0.75 - 0.95
Baldios	0.10 - 0.30

Tabela 6 - Valores do coeficiente de escoamento, (Chow, 1964).

Áreas Agrícolas			
Tipos de solos	C		
	Cobertura da bacia		
	Culturas	Pastagens	Bosques e florestas
Com capacidade de infiltração superior à média	0.20	0.15	0.10
Com capacidade de infiltração média	0.40	0.35	0.30
Com capacidade de infiltração inferior à média	0.50	0.45	0.40

Os valores do coeficiente de escoamento, expostos anteriormente, adequam a um período de retorno incluído entre 5 e 10 anos; para as precipitações com menos intensidade será indispensável corrigir o coeficiente de escoamento por medida de um coeficiente de ajustamento, C_i , (Wright-McLaughlin, 1969). De referenciar que o produto do coeficiente de escoamento pelo coeficiente de ajustamento não pode superar a unidade. Assim, a fórmula é definida por:

$$Q_p = C \cdot C_f \cdot I \cdot A_b \quad (\text{eq. 28})$$

Sendo:

C_f - coeficiente de ajustamento é definido pela seguinte forma:

Tabela 7 - Coeficiente de ajustamento, (Wright-McLaughlin, 1969).

Período de retorno, T (anos)	Coeficiente de ajustamento, C_f
25	1.10
50	1.20
100	1.25

Fórmula de Giandotti

$$Q_p = \frac{\lambda \cdot A_b \cdot h_{max}}{t_c} \quad (\text{eq. 29})$$

Sendo:

A_b - área da bacia (km^2);

h_{max} - altura de precipitação para uma durabilidade igual ao tempo de concentração e um definido período de retorno (mm);

λ - parâmetro influenciado pela área (Tabela 8);

t_c - tempo de concentração (h).

A Tabela 8 apresenta valores apropriados do parâmetro λ em função da área da bacia e os coeficientes de escoamento iguais da fórmula racional. Para bacias hidrográficas com áreas menores a 300 km^2 e entre 300 e 500 km^2 , o parâmetro λ corresponde a um coeficiente de escoamento da fórmula racional maior ou equivalente à unidade, o que não faz sentido, visto que o referido coeficiente é redutor (Quintela, 1982). Desta forma, (Lencastre & Franco, 2006), mencionam que alguns autores propõem a utilização de $\lambda=0.244$, a que ajusta um valor de $C=0.81$.

Tabela 8 - Valores da fórmula de Giandotti, (Lencastre & Franco, 2006).

A_b (km^2)	λ	C (equivalente)
Até 300	0.346	1.25
300 – 500	0.277	1.00
500 – 1000	0.197	0.71
1000 - 8000	0.100	0.36
8000 - 20000	0.076	0.27
20000 - 70000	0.055	0.20

Fórmula de Mockus

Esta fórmula é aplicada a bacias em que o tempo de concentração seja menor a 4 horas, (Martins F. J., 2000). Admite-se um valor máximo do caudal de ponta, para uma frequência, correspondente à precipitação útil com duração $t_r=2t_c^{1/2}$.

$$Q_p = \frac{2,77 \cdot K \cdot A_b \cdot P_e}{\sqrt{t_c} + 0,6 \cdot t_c} \quad (\text{eq. 30})$$

Sendo:

K - fator de ponta da bacia;

A_b - área da bacia (km^2);

P_e - precipitação efetiva (cm);

t_c - tempo de concentração (h).

Fórmula de Temez

Esta fórmula é aplicada para bacias com área menores a 75 km^2 .

$$Q_p = \frac{C \cdot I \cdot A_b}{3} \quad (\text{eq. 31})$$

Sendo:

C - coeficiente de escoamento de Temez (eq. 32);

I - intensidade média de precipitação (mm/h);

A_b - área da bacia (km^2).

$$C = \frac{(P_d - P_0) \cdot (P_d + 23 \cdot P_0)}{(P_d + 11 \cdot P_0)^2} \quad (\text{eq. 32})$$

Sendo:

P_d - precipitação máxima diária (mm);

P_0 - precipitação relativa às perdas diárias da precipitação antes de se iniciar o escoamento superficial (mm), valores variam de 24 mm a 35 mm (eq. 33).

$$P_0 = \frac{5080}{CN} - 50,8 \quad (\text{eq. 33})$$

O parâmetro adimensional CN, representado como número de curva ou de escoamento (“Curve Number”), que descreve o comportamento hidrológico dos diversos tipos de solo, a sua utilização e condições de superfície.

O número de escoamento relata a potencialidade da bacia hidrográfica em produzir escoamento superficial, existindo um valor compreendido entre 0 e 100, que representa os limites inferior e superior, respetivamente, solos com muita condutividade hidráulica ou completamente impermeáveis.

O Soil Conservation Service, faz a classificação dos solos quanto à tipologia hidrológica em quatro grupos, (Lencastre & Franco, 2006):

- tipo A (pequeno potencial de escoamento superficial), solos dando origem a baixo escoamento ou que apresentam permeabilidade bastante elevada. Inclui areias com bastante espessura, e com pouco limo ou argila, e arenitos com bastante espessura e muito permeáveis;
- tipo B (potencial de escoamento superficial inferior à média), solos menos permeáveis que os do tipo A, mas com permeabilidade superior à média. Inclui fundamentalmente solos arenosos menos espessos que os do tipo A e arenitos menos espessos e menos agregados que os do tipo A;
- tipo C (potencial de escoamento superficial superior à média), solos originando escoamentos diretos superiores à média e superiores aos originados pelos tipos anteriores. Inclui solos pouco espessos e solos com quantidades apreciáveis de argilas, se bem que menos do que os do tipo D;
- tipo D (potencial de escoamento superficial alto), solos com argilas expansivas e solos pouco espessos, com sub-horizontes quase impermeáveis que originam elevado escoamento direto.

Na Tabela 9, mostram-se os números de escoamento (CN), para os diversos tipos de solo e condições de humidade AMC-II (situação intermédia na época de cheias) e para diversas utilizações do solo, conforme o Soil Conservation Service, para bacias urbanas. Por sua vez, na Tabela 10, mostram-se os números de escoamento, CN, para bacias rurais.

Tabela 9 - Valor de escoamento consoante utilização do solo, bacias urbanas, (Lencastre & Franco, 2006).

Utilização ou cobertura do solo		Tipo de solo			
		A	B	C	D
Terras cultivadas:					
não cultivadas		72	81	88	91
Cultivadas		62	71	78	81
Pastagens:					
Pobres		68	79	86	89
Boas		39	61	74	80
Prados em boas condições		30	58	71	78
Zonas florestais:					
pouco densas		45	66	77	83
Densas		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, campos de golfe, cemitérios, etc.:					
boas condições: cobertura com 75% ou mais de relva		39	61	74	80
fracas condições: cobertura com 50% a 75% de relva		49	69	79	84
Áreas comerciais e de escritórios (85% de impermeabilização)		89	92	94	95
Zonas industriais (72% de impermeabilização)		81	88	91	93
Zonas residenciais:					
Tamanho dos lotes (média) (m ²)		Imper. (média) (%)			
<500		65		77	85
1000		38		61	75
1300		30		57	72
2000		25		54	70
4000		20		51	68
Lotes de parques pavimentados, telhados, passeios, etc.		98	98	98	98
Ruas, estradas:					
Pavimentadas, com sarjetas e coletores		98	98	98	98
Gravilha		76	85	89	91
Terra batida		72	82	87	89

Tabela 10 - Valor do escoamento para diferentes utilizações do solo, bacias rurais, (Mata-Lima, 2007).

Utilização/cobertura do solo	Estados de superfície	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Cultura arvense	Conforme o maior declive	64	76	84	88
	Conforme as curvas de nível	62	74	82	85
	Conforme as curvas de nível em terraços	60	71	79	82
Rotação de cultura	Conforme o maior declive	62	75	83	87
	Conforme as curvas de nível	60	72	81	84
	Conforme as curvas de nível em terraços	57	70	78	82
Pastagem	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
	Pobre - Segundo o maior declive	47	67	81	88
	Pobre - Segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	Boa - Segundo as curvas de nível	6	35	70	79
Prado permanente	Normal	30	58	71	78
Zonas sociais rurais	Normal	59	74	82	86
Estradas	Pavimento permeável	72	82	87	89
	Pavimento impermeável	74	84	90	92
Floresta	Muito aberta ou de baixa transpiração	56	75	66	91
	Aberta ou de baixa transpiração	46	68	78	84
	Normal	36	60	70	76
	Densa ou de alta transpiração	26	52	62	69
	Muito densa ou de alta transpiração	15	44	54	61
Superfície impermeável		100	100	100	100

Os números de escoamento obedecem ainda das condições prévias de humidade do solo, AMC, em que o Soil Conservation Service identifica três condições, (Mata-Lima, 2007).

- AMC-I - solos secos, mas acima do ponto de emurchimento;
- AMC-II - situação intermédia na época de cheias, corresponde provavelmente as condições de humidade antecedentes de cheias de dimensão pequena;
- AMC-III - solo húmido, o solo encontra-se quase saturado, situação propícia a ocorrência de maiores cheias.

Os valores do número do escoamento expostos na Tabela 9 e Tabela 10, adaptam-se à condição AMC-II, mas quando a alteração de humidade do solo se aproximam-se dos limites inferiores ou superiores, AMC-I e AMC-III, os valores do CN devem ser rectificadados de acordo com as equações (eq. 34) e (eq. 35), usando a parte inteira sem arredondamentos do número calculado, obtendo-se CNI e CNIII, (Lencastre & Franco, 2006) e (Methods & Durrans, 2003).

$$CNI = \frac{4,2 \cdot CNII}{10 - 0,058 \cdot CNII} \quad (\text{eq. 34})$$

$$CNIII = \frac{23 \cdot CNII}{10 + 0,13 \cdot CNII} \quad (\text{eq. 35})$$

Para a determinar os caudais de ponta de cheia para frequências elevadas, usualmente adota-se o valor do número de escoamento de AMCIII, (Lencastre & Franco, 2006).

Para condições diferentes da natureza do solo e condições de cobertura para a bacia hidrográfica, o valor do escoamento a considerar para a bacia deve decorrer da média ponderada dos valores do escoamento semelhantes às várias áreas homogéneas em que pode ser dividida a bacia, ou seja:

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{eq. 36})$$

Sendo:

CN - número do escoamento da bacia;

CN_i - número do escoamento para a sub-bacia i;

A_i - área da sub-bacia i (m²).

2.5. Hidrogramas de cheia

2.5.1. Apreciações principais

O hidrograma é uma representação gráfica da mudança de caudal em relação ao tempo. O hidrograma isola picos para analisar posteriormente alguns fenómenos de interesse em Hidrologia, como exemplo, cheias, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010). Ao analisar um hidrograma, para uma secção do curso de água, podem ser ponderadas os seguintes componentes do escoamento (Figura 19):

- Escoamento de base;
- Escoamento direto;
- Escoamento intermédio;
- Escoamento consequente da precipitação sobre a bacia hidrográfica.

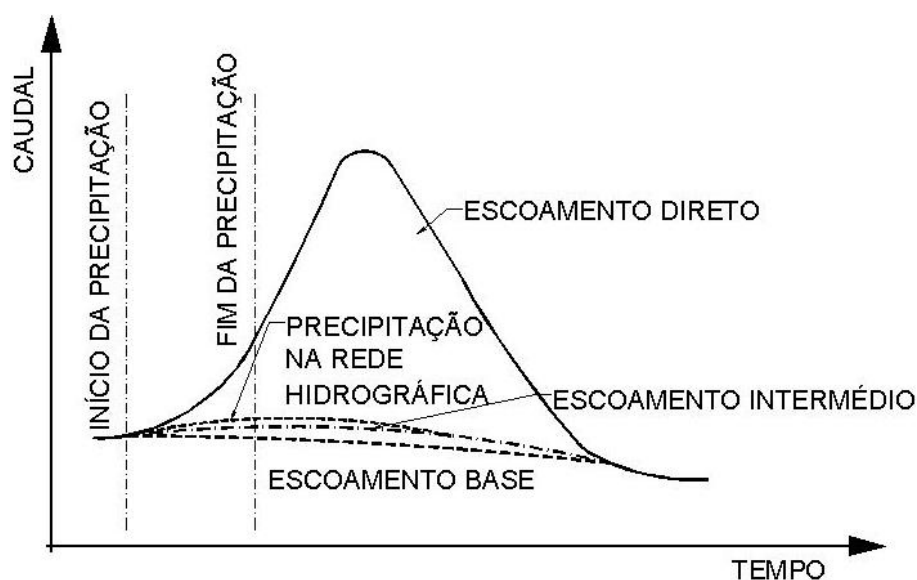


Figura 19 - Integrantes do hidrograma, (Lousada, 2014).

O escoamento de base e o intermédio, são expressos por uma exponencial do tipo:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-at} \quad (\text{eq. 37})$$

Sendo:

Q_t - caudal de uma secção qualquer para instante t ;

Q_0 - caudal para o início do período considerado;

a - coeficiente característico das formações locais.

Atualmente, na análise de hidrogramas, é apenas avaliado o escoamento direto e o escoamento de base, as remanescentes componentes podem-se desprezar porque não são relevantes.

2.5.2. Fatores que influenciam o hidrograma

2.5.2.1. Forma do hidrograma

O hidrograma registado tem normalmente a forma assimétrica, onde podem ser apreciadas quatro partes distintas (Figura 20):

- Curva de crescimento - corresponde ao aumento de caudal, fundada pelo incremento do escoamento, e que acontece durante o tempo de crescimento t_p ;
- Ponta do hidrograma - é o valor máximo;
- Curva de decrescimento - corresponde à diminuição gradual do escoamento direto, e que acontece durante o tempo de decrescimento, t_d . A soma dos dois tempos (crescimento e decrescimento) é igual ao tempo de base do hidrograma, t_b ;
- Curva de esgotamento - corresponde à diminuição exponencial do escoamento de base, depois de cessadas as contribuições dos restantes elementos do escoamento superficial.

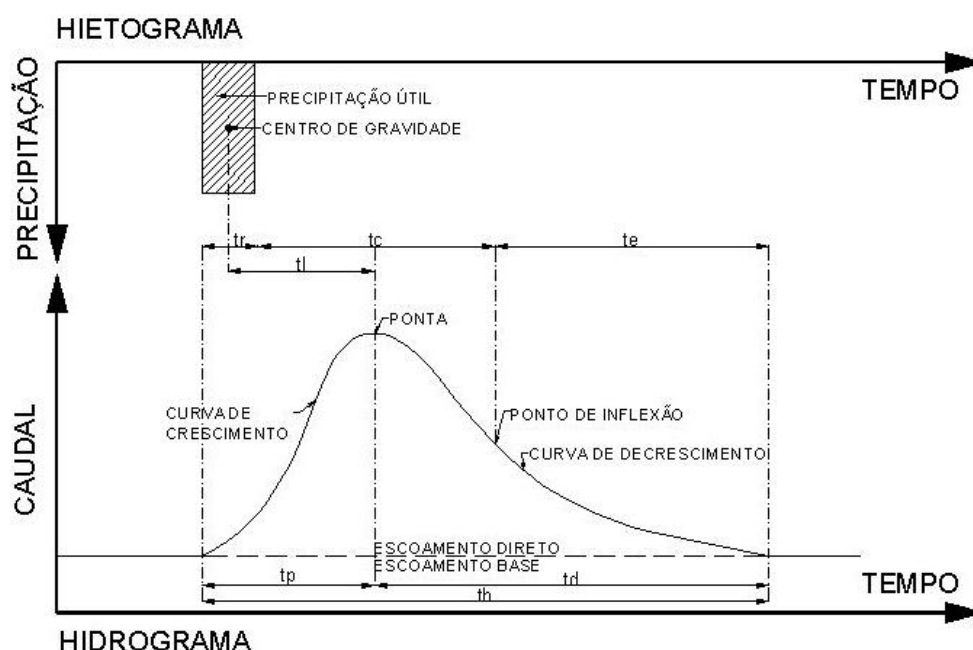


Figura 20 - Forma do hidrograma, (Lousada, 2014).

2.5.2.2. Fatores que podem afetar a forma do hidrograma

Existem vários fatores que influenciam a forma do hidrograma são, fatores referentes à precipitação (forma, intensidade, duração e disposição) afetam predominantemente a definição da curva de crescimento do hidrograma e os seus fatores fisiográficos da bacia (área, formato, densidade de drenagem, relevo e geologia) afetam a curva de decrescimento, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010).

Quando à precipitação acarreta definir os seguintes parâmetros:

- Intensidade da precipitação;
- Taxa de infiltração;
- Capacidade de infiltração;
- Porosidade.

2.5.3. Hidrograma unitário e chuva unitária

É um hidrograma de escoamento superficial direto, onde a área sob da curva corresponde a um volume unitário de escoamento superficial direto, que resulta de uma chuva efetiva com duração e intensidade unitárias, (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2010).

O Hidrograma Unitário (HU) é um dos métodos mais práticos disponíveis para determinar a ligação entre precipitação e hidrograma resultante.

As informações tiradas do emprego do método, podem ser utilizadas na determinação de um hidrograma de projeto para definição de capacidades de obras tais como: galerias de águas pluviais, bueiros rodoviários, vertedores de barragens e estruturas de proteção contra enchentes.

O hidrograma unitário é ajustado por três princípios básicos:

1º Princípio - Princípio da constância do tempo de base constante.

É usado para chuvas de intensidade e durações iguais, mas com distintas alturas, os tempos de escoamento superficial direto são iguais. Exemplo na Figura 21.

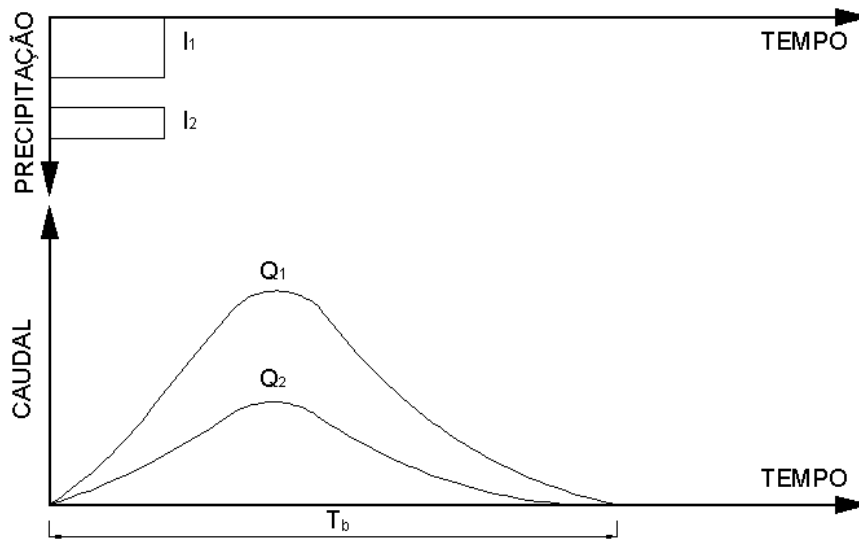


Figura 21 - Tempo de base, (Lousada, 2014).

2º Princípio - Princípio de afinidade ou proporcionalidade dos caudais

É usado para chuvas efetivas de mesma duração, mas com volumes de escoamento superficial diferentes assim produzem em tempos correspondentes, volumes de ESD proporcionais às ordenadas do hidrograma e às chuvas excedentes. Uma chuva unitária, h_1 , gera o escoamento direto V_1 e outra chuva unitária, h_2 , gera o escoamento V_2 . Atendendo aos hidrogramas inseridos na Figura 22 é possível analisar uma afinidade entre V_1 e V_2 em relação ao tempo e as ordenadas, como por exemplo os pontos A_1 e A_2 referentes ao instante T .

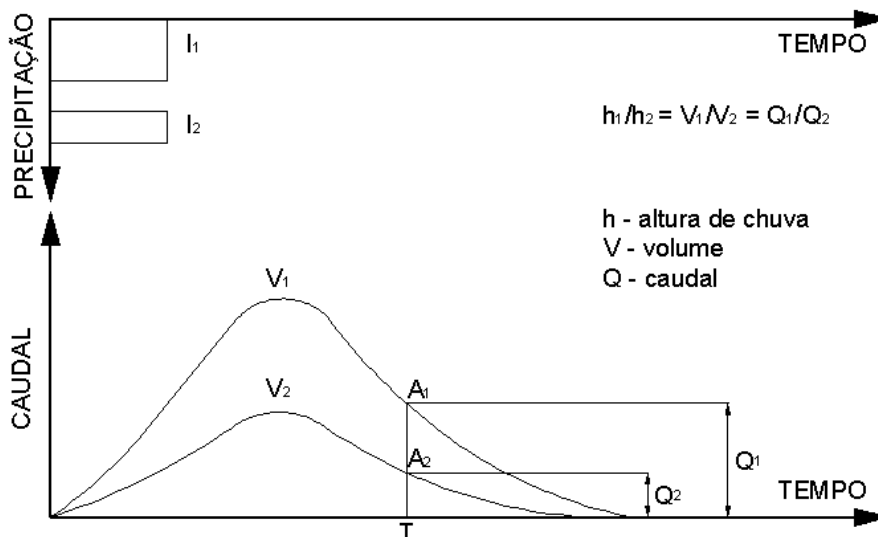


Figura 22 - Princípio de equilíbrio dos caudais, (Lousada, 2014).

3º Princípio - Princípio da aditividade

O tempo de escoamento de uma dada chuva não obedece ao escoamento provocado por uma chuva anterior, assim, o hidrograma total referente a duas ou mais chuvas é obtido adicionando as ordenadas de cada hidrograma em tempos correspondentes as chuvas respetivamente.

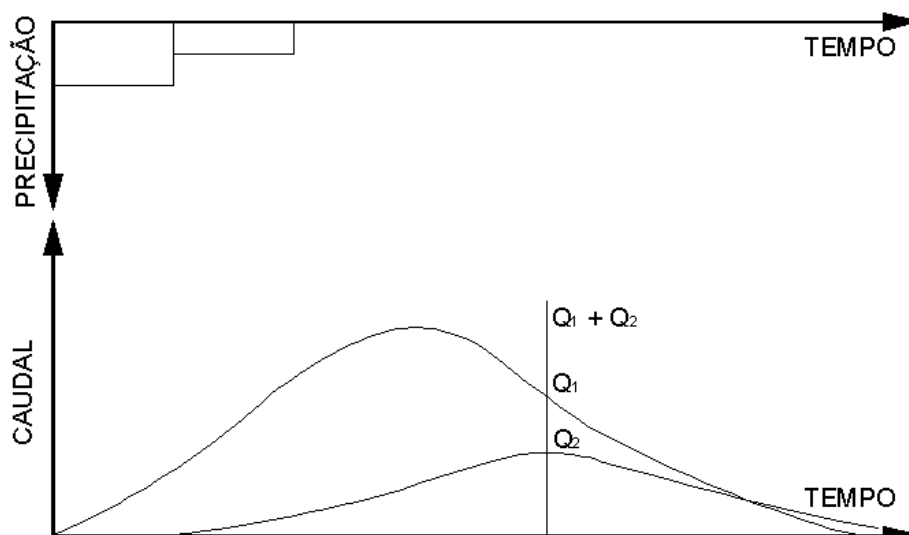


Figura 23 - Princípio de correlação dos caudais, (Lousada, 2014).

A definição de chuva unitária é arbitrária, entretanto para efeito de comparação entre_HU's, costuma-se manter um padrão. Por exemplo, uma chuva com 1 mm e duração de 1h pode ser adotada como chuva unitária. Admite-se que essa chuva seja regularmente distribuída sobre a bacia.

2.6. Curvas de regolfo - canais prismáticos

As curvas de regolfo representam o funcionamento da superfície livre de um escoamento permanente gradualmente variado em canais. O seu cálculo exige que seja resolvida uma equação diferencial ordinária de 1.ª ordem, sujeita a uma conjuntura de fronteira. O cálculo numérico pode ser calculado por diferentes métodos.

O estudo das curvas de regolfo tem por apoio a análise das velocidades do escoamento e da verificação do mesmo, é a diferença, positiva ou negativa, entre altura do escoamento e altura uniforme do mesmo, para o caudal considerado. Assim é possível qualificar o escoamento em

três regimes (crítico, rápido e lento). Se o escoamento está em regime crítico a difusão das perturbações acontece com igual velocidade à do escoamento, em que a velocidade de propagação para montante é nula, e para jusante, correspondente ao dobro da velocidade de escoamento. Se o escoamento está em regime rápido, as pequenas oscilações apenas se difundem para jusante, e a velocidade de propagação para montante é menor que a velocidade do escoamento. No último caso, se o escoamento encontra-se em regime lento, as perturbações propagam-se para montante e para jusante, (Quintela, 1981).

Para definir as curvas de regolfo, usamos por base a equação diferencial (eq. 38) que compara a altura líquida da secção com a coordenada da secção em que essa altura acontece. A (eq. 38) tem por apoio o teorema de *Bernoulli*, para escoamentos duradouros em superfície livre e caudal constante, (Manzanares, 1980).

$$\frac{dH}{ds} = \sin \theta - I \quad (\text{eq. 38})$$

A (eq. 39) compõe a forma geral da equação diferencial de regolfo para canais prismáticos, conseguindo ainda ser assingelada para o caso de o ângulo (θ) ser reduzido. Assim pode admitir-se à seguinte aproximação: $\sin \theta \approx i$ (inclinação). O coeficiente (λ) é dado por $\lambda = \cos \theta$, pode-se neste caso cingir à unidade uma vez que assume-se que o ângulo (θ) adopta um valor reduzido, (Manzanares, 1980).

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\sin \theta - I}{\lambda(1 - F_r^2)} \quad (\text{eq. 39})$$

A observação das diferentes curvas de regolfo, com caudal uniforme em canais prismáticos, é possível através da equação diferencial (eq. 39), conseguindo-se as curvas exibidas na Figura 24. É indispensável realizar-se a classificação antecipada dos declives das estruturas de desvio, (Manzanares, 1980):

- declive nulo (canal horizontal);
- declive negativo (canal ascendente tendo em conta o escoamento);
- declive positivo (canal descendente tendo em conta o escoamento).

O declive positivo é dividido em três grupos que não dependem somente dos atributos do canal, mas do caudal que nele verte, (Manzanares, 1980):

- declive crítico, se escoamento crítico;

- declive fraco, se escoamento lento;
- declive forte, se escoamento rápido.

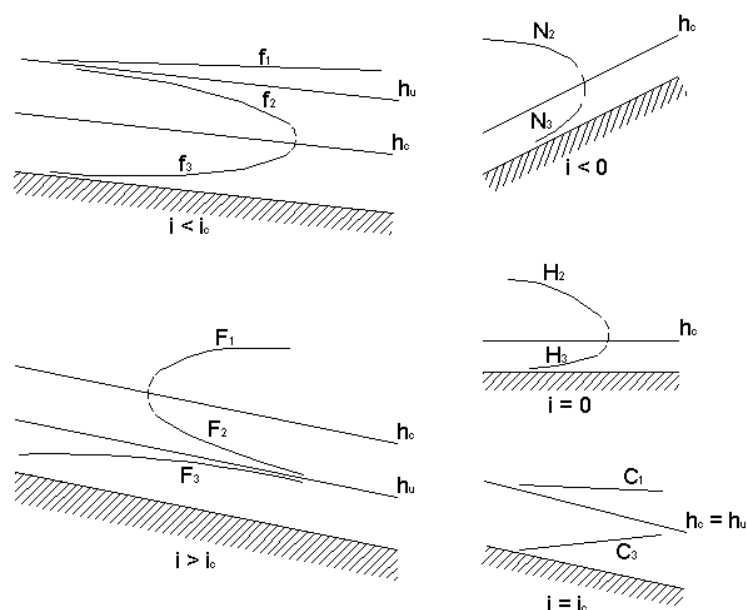


Figura 24 - Curvas de regolfo para canais prismáticos. Declive fraco (f_1 , f_2 e f_3); Declive forte (F_1 , F_2 e F_3); Declive crítico (C_1 e C_2); Declive nulo (H_2 e H_3); Declive negativo (N_2 e N_3), (Manzanares, 1980).

O estudo das diversas curvas de regolfo expostas na Figura 24 recolhe, como hipótese, que a perda de carga unitária é uma função declinante com a altura, deste modo, a análise perde autenticidade quando, (Manzanares, 1980):

- O canal ostenta uma secção fechada, conseguindo mostrar para o idêntico caudal duas soluções de altura uniforme;
- O canal ostenta secção composta, conseguindo mostrar para o idêntico caudal duas soluções de altura crítica.

2.7. Coeficiente de rugosidade

A resistência ao escoamento descreve os processos pelos quais a forma física e a rugosidade de um canal controlam a profundidade, largura e velocidade média do escoamento no canal. Estes processos são explicados por um coeficiente de resistência, (Suárez, 2000). Existem três coeficientes mais usados, sendo eles, n de Manning, C de Chezy e f de Darcy-Weisbach.

Muitas obras de canais são dimensionadas e feitas baseadas na fórmula de Manning e um dos motivos é, que é mais fácil estimar a rugosidade de Manning do que a fórmula de Darcy-Weisbach. Existem muitas medições e aferições do uso do coeficiente de Manning de

maneira, a que uma pessoa experiente pode, com relativa facilidade escolher o valor adequado para cada caso, (Tomaz, 2011). Na Europa é usada geralmente a seguinte fórmula de Manning:

$$U = K_s \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i} \quad (\text{eq. 40})$$

Sendo:

U - velocidade média na seção (m/s);

R - o raio hidráulico (m);

i - inclinação (m/m);

$$K_s = \left(\frac{1}{n}\right)$$

n - o coeficiente de Manning (m^{-1/3}s), que pode ser encontrado em tabelas técnicas.

De seguida apresento na Tabela 11 os valores de rugosidade de Manning para canais de diferentes classes.

Tabela 11 - Valores de rugosidade de Manning, (Cirilo, 2001).

Valores de rugosidade de Manning				
Natureza do Fundo	Muito Boa	Boa	Regular	Má
Alvenaria de pedra argamassada	0.017	0.020	0.025	0.030
Alvenaria de pedra aparelhada	0.013	0.014	0.015	0.017
Alvenaria de pedra seca	0.025	0.033	0.033	0.035
Alvenaria de tijolos	0.012	0.013	0.015	0.017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0.011	0.012	0.013	0.016
Canais abertos em rocha (irregular)	0.035	0.040	0.045	-
Canais c/ fundo em terra e talude c/ pedras	0.028	0.030	0.033	0.035
Canais c/ 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
Canais de terra (retilíneos e uniformes)	0.017	0.020	0.023	0.025
Canais dragados	0.025	0.028	0.030	0.033
Condutos de barro (drenagem)	0.011	0.012	0.014	0.017
Condutos de barro vitrificado (esgoto)	0.011	0.013	0.015	0.017
Condutos de prancha de madeira aplainada	0.010	0.012	0.013	0.014
Gabião	0.022	0.030	0.035	-
Superfícies de argamassa de cimento	0.011	0.012	0.013	0.015
Superfícies de cimento alisado	0.010	0.011	0.012	0.013
Tubo de ferro fundido revestido c/ alcatrão	0.011	0.012	0.013	-
Tubo de ferro fundido sem revestimento	0.012	0.013	0.014	0.015
Tubos de bronze ou de vidro	0.009	0.010	0.012	0.013
Tubos de betão	0.012	0.013	0.015	0.016
Tubos de ferro galvanizado	0.013	0.014	0.015	0.017
Córregos e rios limpos retilíneos e uniformes	0.025	0.028	0.030	0.033
Córregos e rios limpos retilíneos e uniformes c/ pedras e vegetação	0.030	0.033	0.035	0.040
Córregos e rios limpos retilíneos e uniformes c/ meandros e poços	0.035	0.040	0.045	0.050
Margens espaiadas c/ pouca vegetação	0.050	0.060	0.070	0.080
Margens espaiadas c/ muita vegetação	0.075	0.100	0.125	0.150

CAPÍTULO 3

3. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA EM ESTUDO E INTEGRAÇÃO NA REGIÃO

3.1. Integração geral

Situado no Atlântico Norte com origens vulcânicas e a cerca de 560 km da costa de Marrocos, o arquipélago da Madeira possui uma área de 802 km² é formado pelas ilhas da Madeira (742 km²), a maior, e do Porto Santo (43 km²), ambas habitadas, para além das Desertas (14 km²) e Selvagens (3 km²), estas últimas não povoadas. De seguida apresenta-se os principais aspectos físicos da ilha da Madeira.

O Arquipélago da Madeira tem muitas condições que contribuem para uma maior ocorrência de cheias potencialmente perigosas. Enumeram-se as principais:

- Ha cerca de 126 bacias hidrográficas que preenchem quase totalidade da região e cerca de 95% têm uma área menor que 25 km²;
- As 10 maiores bacias correspondem a 45% da área total da ilha;
- Em geral as ribeiras possuem, comprimentos curtos (inferiores a 21 km) influenciando o tempo de concentração das bacias, que é relativamente baixo (inferior a 2 horas);
- Relevo muito acentuado favorece a impulsão ascendente das massas de ar quente tropical marítimo, normalmente incidentes de sudoeste e sul, favorecendo também uma maior dinâmica fluvial e maior risco e aluviões;
- Solo pouco permeável causado pelo substrato vulcânico muito alterado da ilha;

3.2. Enquadramento e caracterização do caso de estudo

Este sub-capítulo é elaborado em grande parte através do *software* ArcMap 10.2.1 como instrumento essencial para a caracterizar as bacias hidrográficas usadas e obter os parâmetros mais importantes.

No final do mesmo, é apresentado um resumo obtido através do *software* ArcMap, com os principais atributos das bacias hidrográficas.

3.2.1. ArcMap 10.2.1 - Metodologia

O programa ArcMap é um componente do *software* ArcGIS, que faz o processamento geo-espacial e usado para visualizar, editar, criar e analisar dados. Permite a exploração de dados dentro de um conjunto de dados e a criação de mapas. Após a utilização é possível salvar, imprimir e exportar arquivos em formato PDF.

Utilizando os ficheiros MDT (Modelo Digital do Terreno) no formato “.asc”, ficheiros cedidos pela docente, foi feita uma análise das três bacias hidrográficas estudadas nesta dissertação, por forma a obter todos os padrões característicos imprescindíveis para desenvolvimento.

Em primeiro lugar seleciona-se os ficheiros “.asc” e exporta-se para a coluna “Table of Contents” e continuamente seleciona-se as coordenadas que designam a zona em estudo que, neste caso, é feito deste modo: com o botão direito do rato carrega-se em cima da coluna “Table of Contents”, “Properties”, “Coordinate System”, “Projected Coordinate System”, “UTM”, “Oceans”, “Madeira_1936_UTM_Zone_28N” assim obtém-se o ficheiro final da (Figura 56).

Continuamente é essencial fundir os ficheiros “.asc” para o único ficheiro (Figura 57), para isso no menu principal seleciona-se “Windows”, “Image Analysis”, Escolhe-se todos os ficheiros “.asc” e em “Processing” clica-se no botão “Blend”.

Prosegue-se com o tratamento do recente ficheiro, utilizando o processo “Fill”, que permite completar os valores de altitudes do ficheiro, ir a “ArctoolBox”, “Spatial analyst tools”, “Hydrology”, “Fill”, e no primeiro campo introduz-se o ficheiro criado anteriormente.

De seguida cria-se o “Flow direction” (Figura 58), que identifica todos os cursos de água utilizando os mesmos passos anteriores so que no fim seleciona-se, “Flow direction” e no primeiro campo introduz-se o ficheiro “Fill” criado anteriormente.

Finaliza-se o processo com o “Flow accumulation” (Figura 59), que identifica os cursos de água primários, com os mesmos passos anteriores, mas no final usa-se “Flow accumulation”, mas no primeiro campo escolhe-se o ficheiro “Flow direction” criado anteriormente.

Para definir as bacias hidrográficas é necessário nomear a secção de referência. Para tal usa-se o botão “Catalog” e com o botão direito clicando em, “New”, “Shapefile” e nomea-se o nome para cada bacia hidrográfica, em “Feature Type” escolhe-se “Point” e clica-se em “Edit”, “Projected Coordinate System”, UTM, Oceans, Madeira_1936_UTM_Zone_28N ver (Figura 60 e Figura 61), faze-se este procedimento para cada bacia.

Criado o ponto, clica-se no botão “Editor”, “Star Editing”, escolhe-se o nome dado ao ponto; na barra que surge após clicar em “Editor”, “Create Features”, escolhe-se o ponto criado para

a respetiva bacia e na barra, clica-se em “Point”; agora no ArcMap, no ficheiro “Flow accumulation”, clica-se no ponto final do curso de água primário em estudo a jusante unido a foz e na barra, clicar em “Save” e depois em “Stop Editing”.

Em seguida clica-se em “ArctoolBox”, “Spatial analyst tools”, “Hidrology”, “Snap pour point”, insere-se os respetivos dados nos campos reservados, o ponto da bacia concebido no passo anterior e o “Flow accumulation”.

Para finalizar, fazer o mesmo processo anterior so que no final selecionar “Watershed”, inserir os respetivos dados nos campos destinados, o “Snap pour point” criado anteriormente e o “Flow direction”. Assim finaliza-se o tratamento dos ficheiros MDT e a delimitação das bacias hidrográficas pretendidas, (Figura 25).

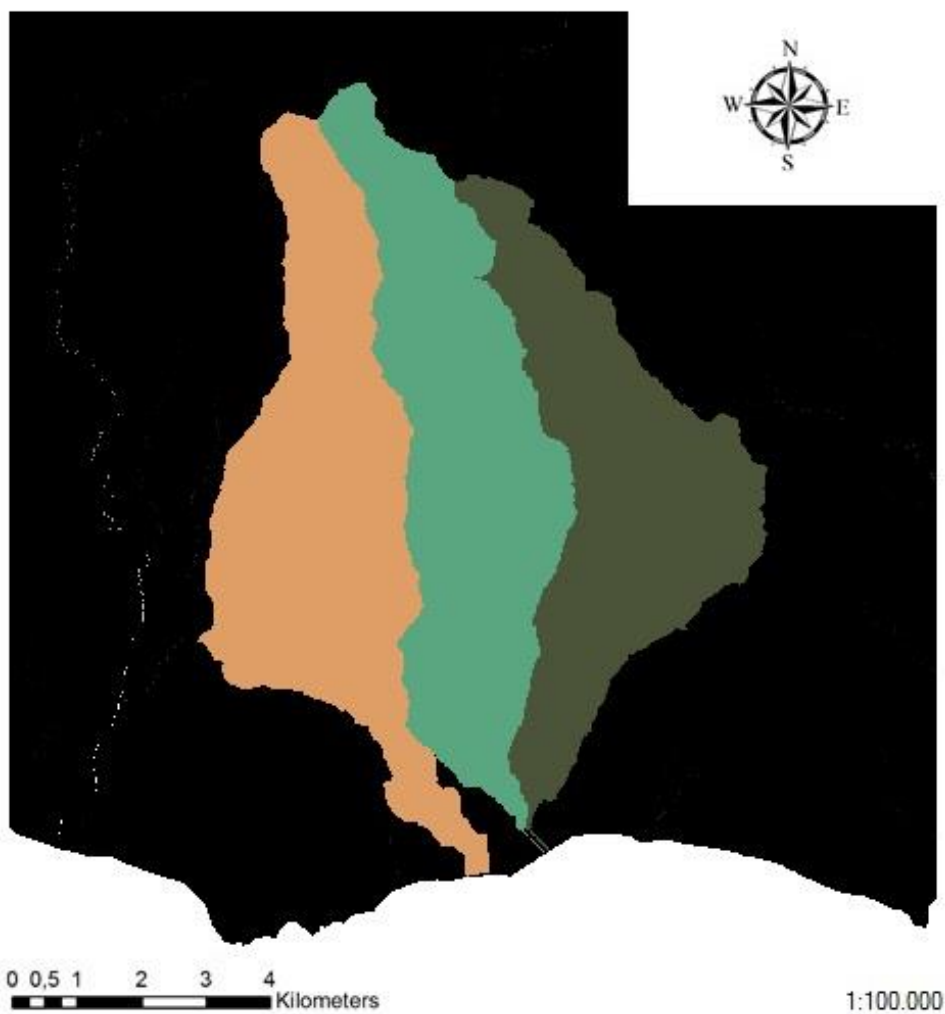


Figura 25 - Limites das bacias.

Área da bacia hidrográfica

A área e perímetro são obtidos através do seguinte processo, ir a “ArctoolBox”, “Conversion Tools”, “from raster”, “raster to polygon”, insere-se “watershed” no espaço para o efeito e tira-se o visto da opção “simplify polygons”. Depois ir ao ficheiro criado, com o botão direito do rato clica-se em “Attribute Table”, obtem-se assim a tabela com os valores essenciais, (Figura 26).

OBJECTID*	Shape*	Id	gridcode	Shape Length	Shape Area
1	Polygon	1	0	32920	14956899,999999

Figura 26 - “Attribute Table” da bacia de S. João.

Curva hipsométrica

Para gerar a curva hipsométrica, cria-se um “raster” com as alturas, ir a “ArctoolBox”, “Spatial analyst tools”, “Extraction”, “Extract by mask” e insere-se o “watershed” e “Fill” nos espaços para o efeito.

Depois, reclassifica-se o ficheiro anterior, para agrupar as alturas em classes designado como mapa hipsométrico, (Figura 28), então ir a “ArctoolBox”, “Spatial analyst tools”, “Reclass”, “Reclassify” seleciona-se o ficheiro criado e ir a “Classify...” e na nova janela em “Classification method” seleciona-se “Equal Interval” e em “Classes” escolhe-se o número de classes para 20.

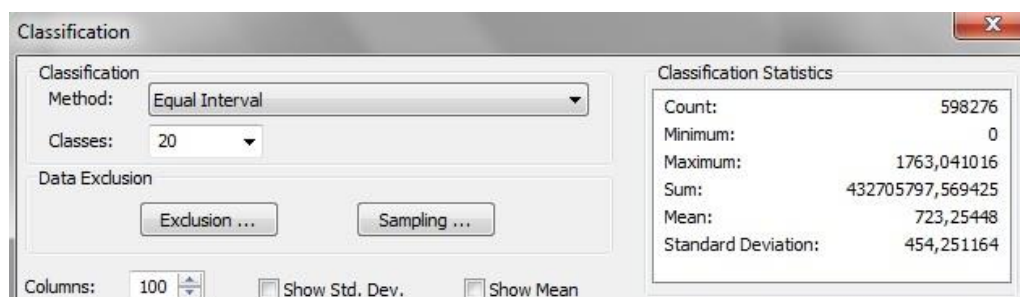


Figura 27 - exemplo da janela “Classification method”.

Para retirar os dados em formato de tabela e exportar para Excel, para a obtenção da curva hipsométrica (Figura 29), ir a “ArctoolBox”, “Spatial analyst tools”, “Zonal”, “Zonal Statistics as

Table” e insere-se o ficheiro criado e o decorrente do segundo passo, nos espaços para o efeito.

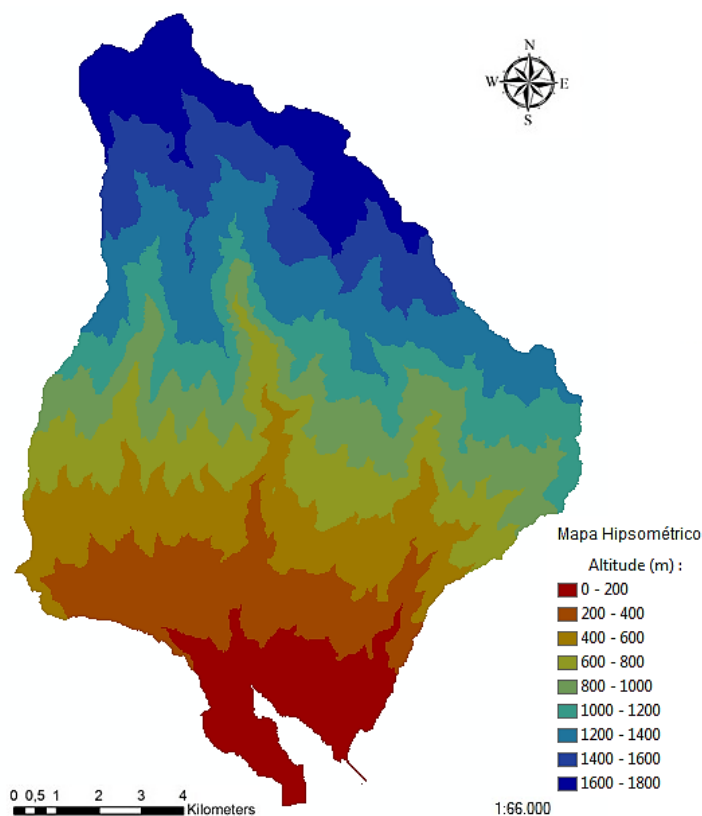


Figura 28 - Mapa hipsométrico das bacias.

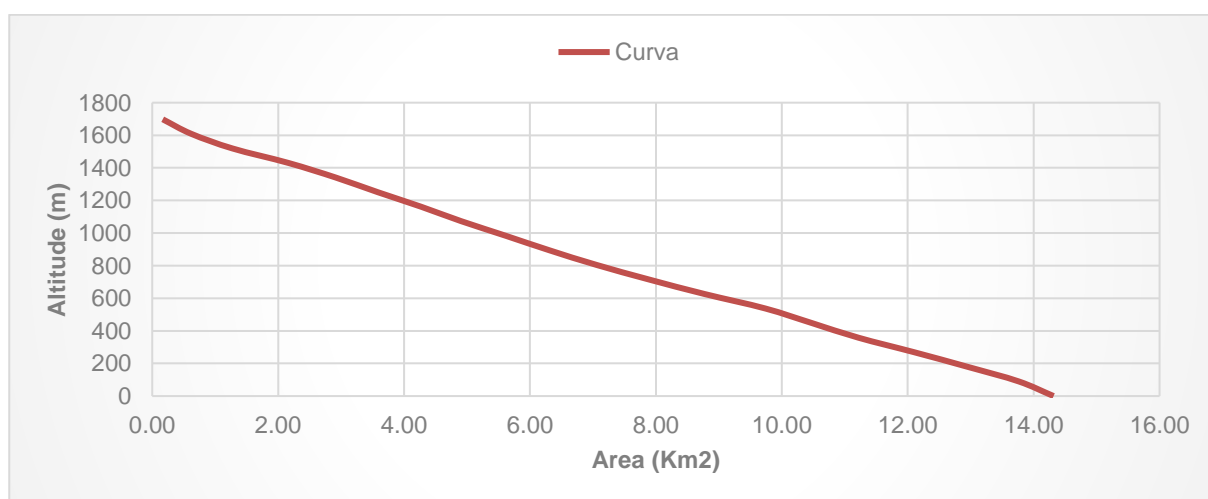


Figura 29 - Curva hipsométrica de Santa Luzia.

Perfil longitudinal do curso principal da bacia

Para obter o perfil longitudinal utiliza-se a barra de ferramentas “3D Analyst”, clica-se em “Interpolate Line”. Esta ferramenta permite desenhar uma linha sobre a linha de água e assim obtem-se um gráfico da altura em função do comprimento (Figura 30). Desenha-se a linha sobre o curso de água primário de montante para jusante, depois para conseguir os dados, na mesma barra de ferramentas, selecciona-se “Profile Graph”, clica-se com o botão direito do rato sobre o mesmo e selecciona-se “Export” para exportar como folha de Exel.

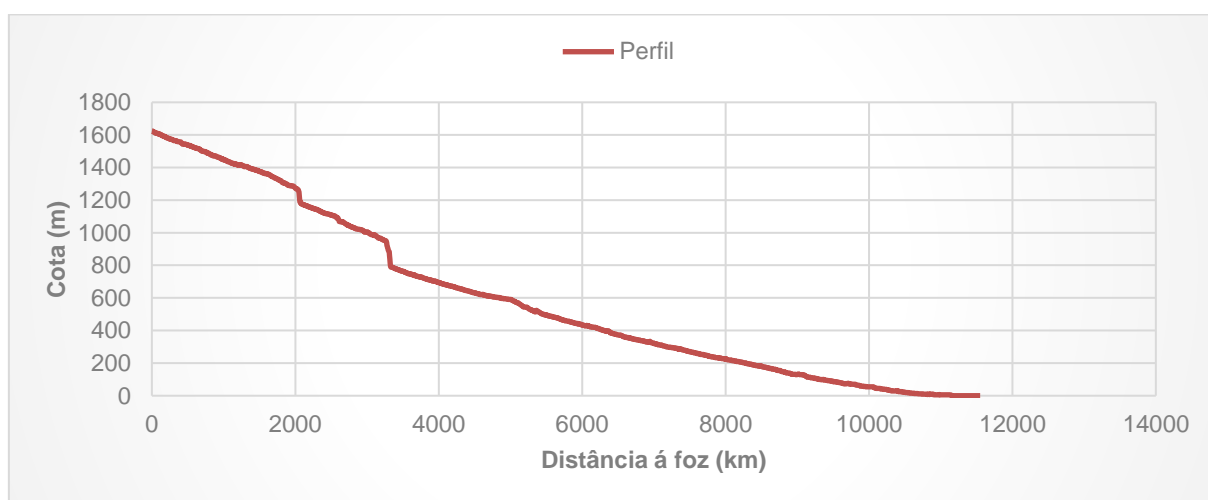


Figura 30 - Perfil longitudinal de Santa Luzia.

Hierarquização dos cursos de água

Ir a “Spatial Analyst Tools”, “Map Algebra”, “Raster Calculator” e introduzi-se a expressão matemática dos mapas “(Con(“FlowAcc_Flow1” > 500,1)”, para identificar e obter a rede de drenagem da bacia, que correspondem às linhas de água existentes. O valor especificado depende do utilizador, uma vez que, se o limite definido for muito baixo, vai gerar uma rede demasiado densa e pouco real e, no caso de um limite muito alto, a rede vai ser demasiado simples e pode não incluir linhas de escoamento pequenas, mas importantes. Foi utilizado o valor de 500.

Depois identifica-se cada um dos troços da rede de drenagem, para cada bacia, através do processo “ArctoolBox”, “Spatial Analyst Tools”, “Hidrology”, “Stream Link” e insere-se nos campos assinalados o raster “rastercalc” e “watershed”.

O último passo consta obter a hierarquização da rede de drenagem; assim, clica-se em “ArctoolBox”, “Spatial Analyst Tools”, “Hidrology”, “Stream Order” e insere-se os campos assinalados, o raster feito anteriormente e o “flow direction”. Fazer o processo para ambos os casos “Shreve” (Figura 31) e “Strahler” (Figura 32).

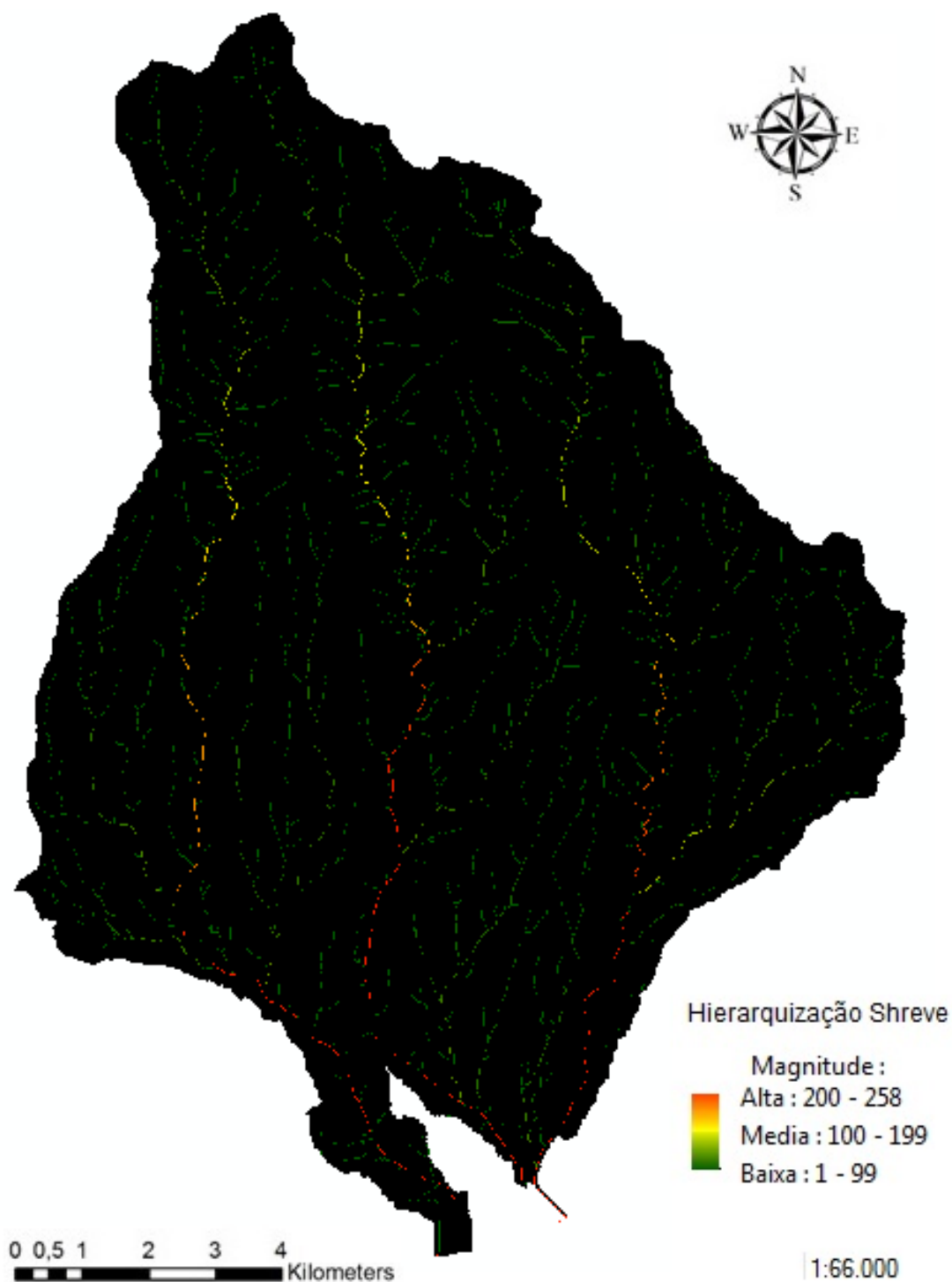


Figura 31 - Rede de drenagem Shreve.

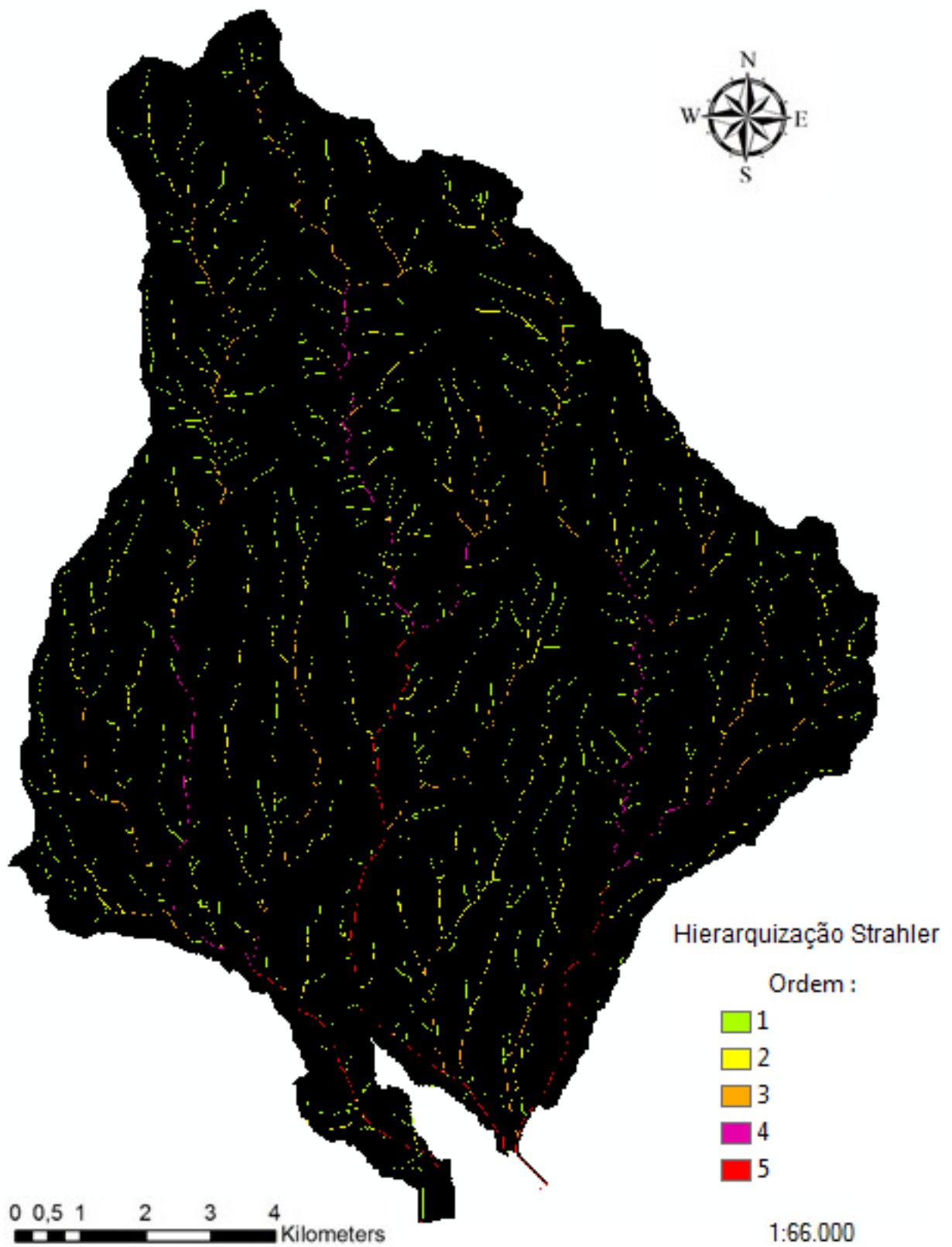


Figura 32 - Rede de drenagem Strahler.

Estações udométricas

É necessário introduzir as estações udométricas para o cálculo da precipitação média, utilizando o método de Thiessen. Na folha de cálculo cria-se uma tabela com os campos, Nome, Coordenada X e Coordenada Y e gravar no formato “.csv”. No ArcGis adiciona-se o ficheiro criado anteriormente através de “File”, “Add data”, “Add data XY”, seleciona-se o ficheiro, no campo, X e Y Field assinala-se, as colunas “Coordenada X” e “Coordenada Y” e em “Edit”, seleciona-se as coordenadas geográficas em “Coordinate System”, “Projected Coordinate System”, “UTM”, “Oceans”, “Madeira_1936_UTM_Zone_28N”. Depois é preciso fazer um novo “shapefile” para traçar os polígonos de Thiessen no programa ArcGis, após, exporta-se para o AutoCAD e obtêm-se as áreas para cada estação udométrica.

Tabela 12 - Estações para o método de Thiessen.

Nome	Coordenada X	Coordenada Y
Areeiro	320746	3621554
ETA Alegria	320261	3617220
ETA Santa Quitéria	317452	3615056
Santo António	317859	3616687

Declive médio da bacia

Para obter o *raster* com o declive, clica-se em “ArctoolBox” seleciona-se “Spatial Analyst Tools”, “Surface”, “Slope” e insere-se o *raster* com as alturas da bacia e depois seleciona-se “Degree” para graus ou “Percent_rise” para percentagem.

3.2.2. Caracterização das bacias hidrográficas

Após a recolha e tratamento de dados originários do ArcGis vamos agora determinar, numa folha de cálculo Excel, os parâmetros indispensáveis à caracterização das bacias hidrográficas usando as formulações posteriormente descritas, ilustrando o cálculo para a bacia hidrográfica de São João.

Índice de compacidade ou de Gravelius

Relação entre o perímetro da bacia P e a área A da bacia. Este coeficiente é adimensional e o seu valor não depende do tamanho da bacia. No mínimo corresponde a 1 indicando a

presença de uma bacia circular e quando mais próximo da unidade for o valor maior será a tendência para grandes cheias.

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.282 \frac{32.920}{\sqrt{14.957}} = 2.400 \quad (\text{eq. 41})$$

Índice de alongamento

Relaciona o diâmetro de um círculo com área igual à da bacia (m) e o comprimento da bacia ao longo do canal principal (m). Quanto menor este índice menor o risco de cheias na bacia hidrográfica. O comprimento da bacia foi calculado com recurso à ferramenta “Measure” do ArcGIS medindo o segmento mais a montante até ao ponto mais a jusante da bacia.

$$K_L = \frac{D_c}{L} = \frac{157352.695}{9795.362} = 16.064 \quad (\text{eq. 42})$$

Fator de forma

Traduz a relação entre o comprimento da bacia e a sua área, uma bacia com um fator de forma baixo encontra-se menos sujeita à ocorrência de cheias que outra do mesmo tamanho, mas com um fator de forma maior, já que na bacia alongada a probabilidade da ocorrência de chuvas intensas cobrindo a totalidade da bacia é pequena.

$$K_F = \frac{A}{L^2} = \frac{14.957 * 10^6}{9795.362^2} = 0.156 \quad (\text{eq. 43})$$

Altitude média

Este parâmetro foi calculado através da relação entre o somatório dos produtos da altitude média entre duas curvas de nível consecutivas, Z_i e o valor da respetiva área A_i , e da área total da sub-bacia A .

$$\bar{Z} = \frac{\sum \overline{Z_i \times A_i}}{A} = \frac{10.975 * 10^9}{14.957 * 10^6} = 733.800 \text{ m} \quad (\text{eq. 44})$$

Altura média

Para este cálculo consideramos a referência como a origem das alturas, a cota da secção de referência da bacia $Z_{min} = 0m$.

$$\bar{H} = \bar{Z} - Z_{min} = 733.800 - 0 = 733.800 \text{ m} \quad (\text{eq. 45})$$

Comprimento do curso de água principal

Este parâmetro foi calculado com recurso às tabelas de “RasterT” e isolando os parâmetros correspondentes ao “Gridcode”, parâmetro de maior ordem que corresponde aos do curso principal.

Declive médio do curso de água principal

Foi calculado através da relação entre o comprimento do curso de água principal e a respetiva altura.

$$i = \frac{1763.041}{1000 * 12.012} \times 100 = 11.6 \% \quad (\text{eq. 46})$$

Declive 10-85

Este parâmetro é calculado fazendo a relação entre a diferença das cotas a 85% do comprimento do curso e a 10%, com 75% do comprimento total do curso.

$$\begin{aligned} \text{Declive } 10 - 85 &= \frac{\text{Cota a } 0,85L - \text{Cota a } 0,10L}{0,75L} * 100 \\ &= \frac{1325.230 - 46.165}{0,75 * 12012} * 100 = 14.2 \% \end{aligned} \quad (\text{eq. 47})$$

Declive médio da bacia em percentagem

Este declive faz a relação entre o produto da equidistância das curvas de nível com o comprimento das mesmas e a área total da sub-bacia.

$$i_{med} = \frac{Eq * L_{Tot}}{A} \times 100 = \frac{152.84 * 49921.944}{14.957 * 10^6} \times 100 = 51 \% \quad (\text{eq. 48})$$

Declive médio da bacia em graus

Parâmetro calculado fazendo a conversão de % para ° através de uma regra de 3 simples.

$$x = \frac{51\% * 90^\circ}{100\%} = 45.9^\circ \quad (\text{eq. 49})$$

Hierarquização de Strahler

Os cursos de água serão ordenados de acordo com uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação existente dentro de uma bacia hidrográfica.

Os dados para este parâmetro foram obtidos através do ArcGIS, nomeadamente através da função “Stream Ordem” e a tabela obtida foi a seguinte;

StreamO_Stra_s_luzia			
	OBJECTID *	Value	Count
▶	1	1	6364
	2	2	3758
	3	3	1628
	4	4	813
	5	5	1036

Figura 33 - Classificação de Strahler de acordo com o ArcGIS

Comprimento dos cursos de água

Este valor foi calculado somando o comprimento das polylinhas com recurso ao AutoCAD

Hierarquização de Shreve

Esta classificação foi obtida através da tabela de atributos do Arcgis “StreamO_Shreve” realizada com recurso à função “Stream Ordem” para cada bacia hidrográfica.

Tempos de concentração

O tempo de concentração mede o tempo que uma gota de água leva a percorrer o trecho superficial desde o ponto mais distante até ao trecho considerado, este não é uma constante para uma dada área mas varia dependendo do recobrimento vegetal e a altura e dispersão da precipitação sobre a bacia.

Existem várias fórmulas empíricas para a determinação do tempo de escoamento e uma vez que apenas possuímos informações geométricas e morfológicas da bacia teremos que escolher as formulas que dependam apenas desses parâmetros.

Tempo de concentração de Témez

$$Tc = 0,3 * \left(\frac{L}{D^{0,25}}\right)^{0,76} = 0,3 * \left(\frac{12.012}{51^{0,25}}\right)^{0,76} = 0.940 \text{ horas} \quad (\text{eq. 50})$$

Sendo:

L - comprimento do curso de água principal (km);
D - declividade média da bacia (%).

Tempo de concentração de Ven Te Chow

$$T_c = 0,8773 * \left(\frac{L}{\sqrt{D}}\right)^{0,64} = 0,8773 * \left(\frac{12.012}{\sqrt{51}}\right)^{0,64} = 0.873 \text{ horas} \quad (\text{eq. 51})$$

Sendo:

L - comprimento do curso de água principal (km);
D - declividade média da bacia (%).

Tempo de concentração Giandotti

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{0,8 * \sqrt{H_{med}}} = \frac{4 * \sqrt{14.957} + 1,5 * 12.012}{0,8 * \sqrt{733.800}} = 1.545 \text{ horas} \quad (\text{eq. 52})$$

Sendo:

L - comprimento do curso de água principal (km);
 H_{med} - altura média (m);
A - área da bacia (Km^2).

Tempo de concentração média

Foi calculado através da média dos tempos de concentração anteriores.

Densidade de Drenagem

Caracterizar uma rede de drenagem de uma bacia hidrográfica passa também por quantificá-la na sua extensão.

Esta quantificação faz-se recorrendo a um índice que relaciona o comprimento total dos cursos de água L_t , e a área da bacia.

$$D_d = \frac{L_t}{A} = \frac{43.500}{14.957} = 2.908 \text{ Km/Km}^2 \quad (\text{eq. 53})$$

Este parâmetro fornece uma boa indicação da eficiência da drenagem natural da bacia. Em termos genéricos variam entre 0,5 a 3,5 para bacias mal drenadas e superiores a 3,5 para bacias bem drenadas, fazendo desta bacia uma bacia relativamente mal drenada.

Percurso médio sobre o terreno

Traduz a distância média em Km, que a água da chuva tem que percorrer até atingir o curso de água mais próximo. O seu valor é aproximadamente um quarto do inverso da densidade de drenagem.

$$\bar{P} = \frac{A}{4 * L_t} = \frac{14.975}{4 * 43.50} = 0.086 \text{ Km} \quad (\text{eq. 54})$$

Densidade hídrica

Este parâmetro traduz a relação entre o número de cursos de água e a área da bacia.

$$D_h = \frac{Nc}{A} = \frac{221.000}{14.975} = 14.776 \text{ cursos/Km}^2 \quad (\text{eq. 55})$$

É apresentada de seguida uma tabela com as principais características das três bacias hidrográficas, originada depois da recolha e tratamento dos dados oriundos do ArcGis, Excel e AutoCAD.

Tabela 13 - Características das bacias.
Características das bacias hidrográficas

Parâmetro	São João	Santa Luzia	João Gomes	Unidades
Área	14,957	14,315	12,684	km ²
Perímetro	32,920	31,220	31,400	km
Índice de compacidade de Gravelius (Kc)	2,400	2,327	2,486	adm
Índice de alongamento (KL)	16,064	14,955	17,375	adm
Factor de forma (KF)	0,156	0,144	0,171	adm
Altitude média (Zmed)	733,800	830,100	852,567	m
Altura média (hmed)	733,800	830,100	852,567	m
Comprimento do curso de água principal (L)	12,012	11,789	11,340	km
Altitude máxima do curso de água principal	1763,041	1787,000	1595,000	m
Declive médio do curso de água principal (imed)	140,500	144,600	139,600	m/km
Altura eq. do curso de água principal (Zeq)	1283,800	1260,500	1410,300	m
Declive eq. do curso de água principal (ieq)	0,116	0,111	0,128	%
Declive 10-85 (i10-85)	0,142	0,151	0,160	%
Índice de relevo (irelevo)	0,180	0,179	0,186	adm
Declive médio da bacia	45,900	54,000	44,100	°
Declive médio da bacia	51,000	60,000	49,000	%
Hierarquização de Strahler	5	5	5	Ordem
Número de cursos de água	221,000	258,000	188,000	Unidades
Comprimento total dos cursos de água	43,500	40,300	34,700	km
Hierarquização de Shreve	221	258	188	Magnitude
Relação de bifurcação média	3,801	3,990	3,810	adm
Tempo de concentração (Témez)	0,940	0,899	0,907	Horas
Tempo de concentração (Ven Te Chow)	0,873	0,866	0,855	Horas
Tempo de concentração (Giandotti)	1,545	1,424	1,338	Horas
Tempo de concentração médio	1,127	1,063	1,033	Horas
Densidade de drenagem (Dd)	2,908	2,815	2,736	km/km ²
Percurso médio sobre o terreno	0,086	0,088	0,091	km
Densidade hídrica (Dh)	14,776	18,023	14,822	cursos/km ²

Enquadramento na região

Geologicamente a cidade do Funchal é composta essencialmente por um complexo superior e um complexo intermédio com menos incidência, existindo também depósitos sedimentares junto a foz das ribeiras. Os complexos superiores são derrames lávicos localizados com intercalações piroclásticas com idade a variar entre um milhão e seis mil anos sendo compostos também por rochas ígneas extrusivas. Os complexos intermédios são continuações lávicas com intercalações piroclásticas e isoladas por níveis de erosão com idade a variar entre 2,5 e 1 milhão de anos sendo composto também por rochas ígneas extrusivas, existindo uma cobertura sedimentar para ambos os complexos que podem ser cascalheiras, detritos de aluviões e areias ou rochas sedimentares.

Quanto á ocupação do solo, a cidade do Funchal está inserida numa zona urbana a jusante que inclui um coberto vegetal, oriundo dos parques e jardins, e uma zona com ocupação florestal a montante que contém floresta natural e prado natural. Em anexo esta incluída a Carta de Usos e Ocupação de Solos da Ilha da Madeira, a Carta Geológica da Ilha da Madeira e a Planta de Ordenamento do Concelho do Funchal.

CAPÍTULO 4

4. ORGANIZAÇÃO DE DADOS E TRATAMENTO DE RESULTADOS

4.1. Organização de dados

4.1.1. Precipitações intensas

As precipitações intensas podem ser originadas por fenómenos meteorológicos distintos, dividindo-se em dois grandes tipos: precipitações moderadas e prolongadas e precipitações muito fortes de curta duração, dando origem a cheias.

As precipitações moderadas e prolongadas devem-se ao atravessamento sucessivo de sistemas frontais associados a núcleos de baixa pressão, originam longos períodos de precipitação, por vezes com a duração de vários dias, conduzindo à saturação dos solos, e proporcionando a formação de cheias, com todas as consequências associadas.

Fazer uma análise de cheias, para determinar caudais de ponta de cheia, não só tem benefício para o dimensionamento, mas também para a prevenção de fenómenos extremos para as obras hidráulicas. As durações podem adquirir poucos minutos, até a muitas horas ou dias, conforme a área da bacia hidrográfica que é efetuado a análise, em que, a duração considerada deve ser idêntica ao tempo de concentração.

Para calcular a precipitação média numa superfície qualquer é necessário utilizar as análises dentro dessa superfície e nas suas vizinhanças. Aceita-se a precipitação média como sendo a lâmina de água de altura constante sobre toda a área considerada, associada a um período de tempo dado, cujo estudo pode ser feito com base num temporal isolado, ou com base em totais anuais.

Existem vários métodos para se estipular a precipitação média em uma área. Os mais usuais são o Método da Média Aritmética, Método de Thiessen e Método das Isoietas, analisados de seguida.

1. Método da média aritmética

A precipitação média é calculada como a média aritmética dos valores médios de precipitação, deste modo é um método fácil de aplicar. É importante observar que o método ignora variações geográficas da precipitação e, portanto, é aplicável apenas em regiões planas com variação gradual e suave gradiente pluviométrico e com cobertura de postos de medição bastante densa, (Carvalho & Silva, 2006).

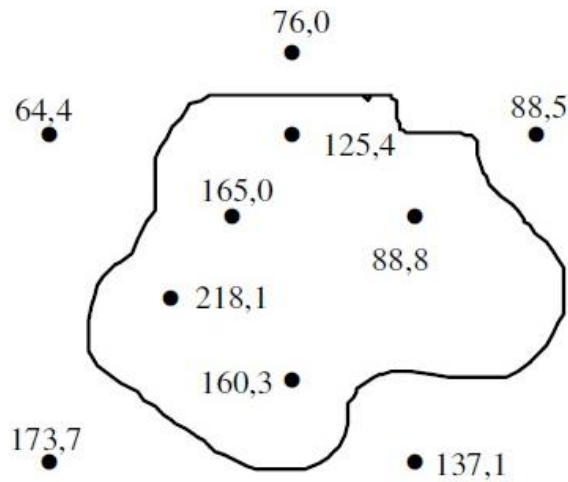


Figura 34 - Média aritmética, (Carvalho & Silva, 2006).

2. Método dos polígonos de Thiessen

Esse método subdivide a área da bacia em áreas delimitadas por retas unindo os pontos das estações, dando origem a vários triângulos. Traçando perpendiculares aos lados de cada triângulo, obtêm-se vários polígonos que encerram, cada um, apenas um posto de observação. Admite-se que cada posto seja representativo daquela área onde a altura precipitada é tida como constante. Cada estação recebe um peso pela área que representa em relação à área total da bacia. Se os polígonos abrangem áreas externas à bacia, essas porções devem ser eliminadas no cálculo, (Carvalho & Silva, 2006). Este método não considera objetivamente as influências orográficas nas chuvas.

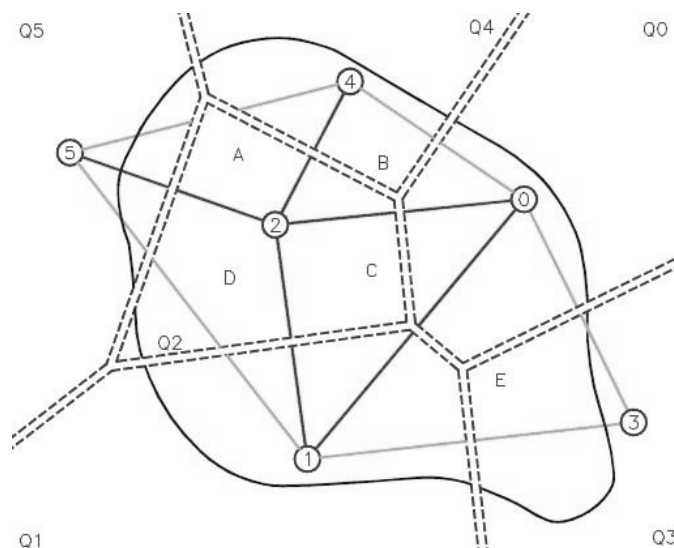


Figura 35 - Método dos polígonos de Thiessen, (Carvalho & Silva, 2006).

3. Método das Isoietas

No mapa da área, são traçadas as isoietas ou curvas que unem pontos de igual precipitação. Na construção das isoietas, o analista deve considerar os efeitos orográficos e a morfologia do terreno, de modo que o mapa final represente um modelo de precipitação mais real do que o que poderia ser obtido de medidas isoladas. Em seguida calculam-se as áreas parciais contidas entre duas isoietas sucessivas e a precipitação média em cada área parcial, que é determinada fazendo-se a média dos valores de duas isoietas. Usualmente se adota a média dos índices de suas isoietas sucessivas., (Carvalho & Silva, 2006).

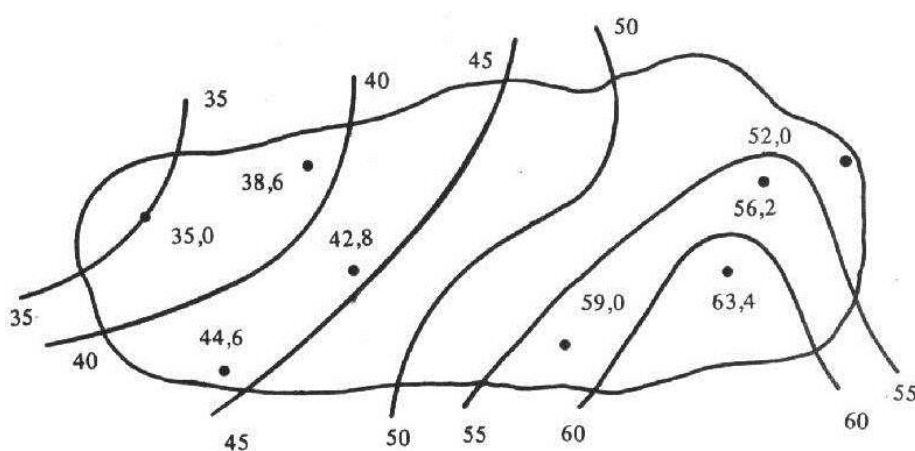


Figura 36 - Método das Isoietas, (Carvalho & Silva, 2006).

4.1.2. Análise probabilística

Para começar este processo de análise, são necessários os valores da precipitação diária de cada estação do concelho do Funchal, para um conjunto de 17 anos iniciado em 1998 e finalizado em 2014, foram os dados possíveis para tratamento, adquiridos através do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos).

Metodologia inicial

Começa-se por identificar as estações que podemos usar nas bacias hidrográficas, utilizando as coordenadas conhecidas para introduzir no ArcGis. Através do AutoCad, calculamos as áreas de cada um dos postos utilizados, aplicamos a fórmula do método de Thiessen e deste modo obtemos a precipitação média diária em cada uma das bacias, demonstrado na tabela seguinte.

Tabela 14 - Precipitação máxima.

Ano Hidrológico	Precipitação máxima (mm)	
	Diária	Anual
1998	113.0	1190.1
1999	84.4	1172.9
2000	77.9	1150.3
2001	155.0	1628.9
2002	84.9	1398.8
2003	65.0	1195.2
2004	129.9	876.1
2005	92.6	1498.0
2006	96.8	1447.0
2007	60.5	795.5
2008	143.3	1099.8
2009	108.6	1554.7
2010	177.1	2491.7
2011	144.3	930.9
2012	187.3	1201.4
2013	60.6	864.5
2014	56.2	1027.9

Após alcançar o valor das precipitações máximas diárias e anuais, descobre-se, os valores da precipitação máxima de 1, 2, 3, 4 e 5 dias para cada bacia estudada, demonstrado na tabela seguinte.

Tabela 15 - Precipitação máxima para 1, 2, 3, 4 e 5 dias.

Ano Hidrológico	Precipitação máxima (mm)				
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias
1998	113.0	167.7	209.8	220.7	256.9
1999	84.4	105.9	125.1	133.5	139.4
2000	77.9	107.5	132.5	160.5	187.9
2001	155.0	265.6	297.5	318.2	373.6
2002	84.9	101.8	131.1	138.4	143.9
2003	65.0	98.4	104.9	137.5	153.1
2004	129.9	142.6	166.3	166.4	166.5
2005	92.6	147.7	165.3	194.0	227.2
2006	96.8	169.4	208.2	216.7	221.3
2007	60.5	112.4	135.0	179.8	213.4
2008	143.3	193.7	225.0	243.1	252.9
2009	108.6	130.7	140.2	184.4	231.4
2010	177.1	229.1	261.8	322.3	337.1
2011	144.3	182.6	228.5	266.9	272.8
2012	187.3	210.7	263.8	290.3	291.5
2013	60.6	104.8	156.4	185.7	230.7
2014	56.2	102.5	111.6	112.8	121.9

Obtenção da Linha de Possibilidade Udométrica

Agora refere-se todo método de ajuste das leis estatísticas para as amostras das variáveis hidrológicas e a consideração dos valores das variáveis, para a função da probabilidade de excedência, obtendo-se após a realização das etapas seguintes.

Em primeiro lugar determina-se, a partir das amostras de precipitação máxima de 1, 2, 3, 4 e 5 dias, ao longo dos 17 anos hidrológicos, os diversos parâmetros estatísticos seguindo as formulas exibidas de seguida.

Coefficiente de assimetria

$$c_a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot s'^3} \quad (\text{eq. 56})$$

Coefficiente de variação

$$c_v = \frac{\sigma^2}{\bar{x}} \quad (\text{eq. 57})$$

Média

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{eq. 58})$$

Desvio-padrão

$$s' = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{eq. 59})$$

Posteriormente adota-se as leis mais adequadas para a representação da distribuição dos valores das amostras, adoptando a, Lei de Galton, Gumbel, Pearson III e Lei normal.

Depois indica-se a lei que melhor se ajusta à amostra, por ajuste visual ou utilizando outras técnicas, sem parâmetros de controlo. Nesta etapa particulariza-se três passos:

- a) Reproduzir gráficamente as leis teóricas, avaliando sucessivas probabilidades de não excedência (F) e determinando os números da variável de precipitação correspondente as probabilidades, de concordância com as diferentes leis usadas.

Tabela 16 - Leis estatísticas.

Leis	Fórmula	Parâmetros
Normal	$\hat{X} = \bar{X} + K \cdot s'$	Usado para precipitação anual máxima
Galton	$\hat{X} = \bar{X} + K \cdot s'$	Logaritmo de base e, usado para precipitação anual máxima
Gumbel	$\hat{X} = \bar{X} + K \cdot s'$	Usado para precipitação anual máxima
Pearson III	$\hat{X} = \bar{X} + K \cdot s'$	Usado para precipitação anual máxima

Sendo:

K - fator de probabilidade sujeito à lei usada.

No seguimento é apresentada uma tabela com expressões para o cálculo K, para as diferentes leis consideradas.

Tabela 17 - Fator probabilidade.

Leis	K	Outros Parâmetros
Normal	$K_N = Z = w - \frac{2,515517 + 0,802853w + 0,010328w^2}{1 + 1,432788w + 0,189269w^2 + 0,001308w^3}$	$w = \sqrt{\ln(T^2)}$
Gumbel	$K_G = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,577216 + \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\}$	-
Pearson III	$K_P = Z + (Z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(Z^3 - 6Z)k^2 - (Z^2 - 1)k^3 + 4Zk^4 + \frac{1}{3}k^5$	$k = \frac{c_s}{6}$

- b) Reproduzir os pontos da amostra numa escala logarítmica, fazendo ajustar para cada um dos pontos a respetiva probabilidade intuitiva.

$$F = i/(N + 1) \tag{eq. 60}$$

Sendo:

i - ordem da amostra;

N - número de amostras.

- c) Selecionar a lei que encaminha para o melhor ajuste visual.

Posteriormente vamos estimar os valores da variável hidrológica nas diferentes durações, 1, 2, 3, 4 e 5 dias, para as probabilidades de não excedência desejadas, ou seja, os períodos de retorno desejados.

Tabela 18 - Precipitações máximas anuais.

Duração (horas)	Lei	Precipitação máxima anual (mm)		
		10 Anos	100 Anos	1000 Anos
24	Galton	165.72	248.60	334.42
48	Gumbel	218.06	311.71	403.67
72	Gumbel	257.46	365.98	472.53
96	Gumbel	288.68	407.32	523.81
120	Galton	321.92	447.94	570.31

Para finalizar definimos uma analogia para o período de retorno desejado, isto é, a linha de possibilidade udométrica (LPU), usando os valores da duração, precipitação e a lei com melhor ajuste.

Tabela 19 - Precipitação máxima, T=100 anos.

T = 100 anos	
Duração (horas)	Precipitação máxima (mm)
24	248.60
48	311.71
72	365.98
96	407.32
120	447.94

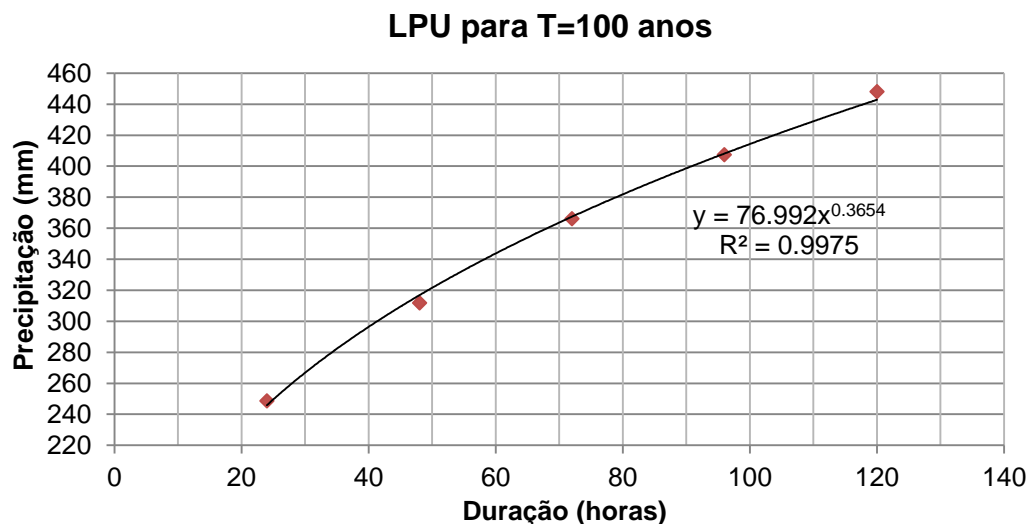


Figura 37 - Linha de possibilidade udométrica, T=100 anos.

As linhas de possibilidade udométrica, LPU, são representadas graficamente através de funções do tipo: $P=a.t^n$ que exibem tal relação, onde “a” e “n” são definidos pelo método do mínimo dos quadrados. Ao aumentar o período de retorno o número do critério “a”, aumenta, e o número do critério “n”, aumenta ou diminui dependendo do período de retorno. Podemos

analisar graficamente que a precipitação aumenta em resultado do aumento do tempo de acumulação.

Numa análise de cheias o tempo da precipitação intensa, para uma secção da rede hidrográfica, deve igualar o tempo de concentração da mesma bacia hidrográfica, a isto designamos de duração crítica, ainda assim, ao analisar a mais elevada intensidade de precipitação em toda a área da bacia para o escoamento naquela secção, chamamos de precipitação crítica, originando um caudal de ponta de cheia alto, para o período de retorno ponderado.

Os dados obtidos anteriormente são indispensáveis para calcular os caudais, usando as diferentes fórmulas associadas.

Caudais de ponta de cheia

Usando as fórmulas empíricas anteriormente descritas no subcapítulo 2.4.1.1 (Formulas empíricas) para os cálculos dos diferentes tipos de caudais, apresentam-se os valores dos caudais de ponta de cheia para as diferentes bacias hidrográficas, os valores obtidos, para cada uma das diferentes fórmulas, têm uma certa disparidade entre si. Isto deve-se às diferenças da base utilizada para a formulação de cada uma delas e, assim para amenizar essas desigualdades, é determinado o valor médio do caudal para utilizar nos cálculos, simulação e modelação. Os valores alcançados para as diferentes bacias hidrográficas são apresentados de seguida.

Tabela 20 - Caudal de cheia.

Caudal de ponta de cheia para as bacias				
Critério	São João	Santa Luzia	João Gomes	Unidades
Caudal (Forti)	133,049	127,892	114,588	m ³ /s
Caudal (Iskowski)	198,404	190,241	169,359	m ³ /s
Caudal (Pagliaro)	413,267	397,963	358,221	m ³ /s
Caudal (Whistler)	84,777	81,326	72,489	m ³ /s
Caudal (Fórmulação Racional)	670,879	664,949	601,589	m ³ /s
Caudal (Giandotti)	331,810	347,747	322,576	m ³ /s
Caudal (Mockus)	336,907	335,147	302,129	m ³ /s
Caudal (Témez)	341,314	338,297	306,062	m ³ /s
Caudal (Média)	313,801	310,445	280,877	m³/s

Tabela 21 - Valores adotados.

Fórmulas	Valores adotados
Forti	$b = 3.25$; $c = 1.00$
Iskowski	$K_{Is} = 0.6$; $m_I =$ interpolação entre 10 e 40 km ² .
Racional	$C = 0.5$; $C_f = 1.25$
Giandotti	$\lambda = 0.346$
Témez	$C = 0.926$; $P_0 = 5.644$; $CN_{II} = 90$; $CN_{III} = 95.392$.

4.1.2. Modelação

Nesta fase é preciso caracterizar os troços das ribeiras adotados como casos de estudo, tais como cotas topográficas, comprimentos e largura dos troços de estudo.

Depois da análise dos troços, o coeficiente de rugosidade, o declive longitudinal dos tramos, a altura normal do escoamento para vários caudais, as curvas de energia específica, são variáveis importantes a ter em conta.

Os modelos utilizados são os seguintes:

- Folha de cálculo programada;
- Programa HEC-RAS;
- Modelo reduzido, canal multifunções.

Os troços selecionados situam-se em vários pontos das três ribeiras do Funchal procurando sempre que possível troços com as mesmas características geométricas mas com diferentes características morfológicas em termos de fundo do canal. Todos os troços têm 23,2 m de comprimento, facilitando a conversão para o modelo reduzido que tem 2,32 m de comprimento útil.

4.1.2.1. Modelos numéricos

HEC-RAS

O programa, HEC-RAS, da *U.S. Army Corps of Engineers' River Analysis System*, permite calcular escoamentos unidimensionais, uniformes ou não uniformes, para canais naturais ou artificiais.

O programa é constituído por uma interface gráfica para o usuário, elementos de análise hidráulica, armazenamento e gestão de dados, análises gráficas e relatórios.

Para iniciar a análise, abre-se o programa, após surgir a janela principal (Figura 38), ir a “File”, “New Project” e, após a criação do ficheiro, clica-se em “Options”, “Unit System (US Customary/SI)” e usa-se o sistema SI.

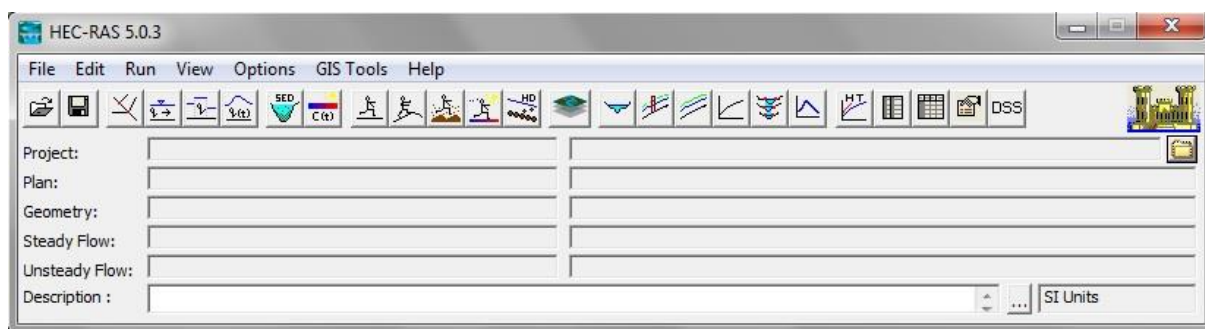


Figura 38 - Janela do programa HEC-RAS.

Depois, vamos ao botão “Edit/Enter geometric data”, e ao abrir a nova janela (Figura 65), seleciona-se “River/Reach”, clica-se num ponto qualquer da folha para iniciar o desenho do canal em planta e clica-se duas vezes no fim para completar o desenho, de seguida insere-se o nome da ribeira e do tramo a ser analisado.

Agora insere-se as secções dos tramos escolhidos, na barra “Editors” ir a “Cross Section”. Na nova janela (Figura 39), em “Options” seleciona-se “Add a new Cross Section” e introduz-se o número da secção, do menor para o maior a iniciar pelo fim do canal. Em “Description” coloca-se um nome à secção e depois em “Cross Section Coordinates” introduz-se os valores que limitam a nossa secção em “Station” e “Elevation”. Em “Downstream Reach Lengths” insere-se o intervalo entre secções para cada margem, margem esquerda (LOB), canal (Channel) e margem direita (ROB). No separador “Manning’s Values” para as margens usa-se $0.018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, paredes de betão em mau estado de conservação e para o fundo do canal, usa-se $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ para coberto vegetal, $0.040 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ para coberto rochoso e para fundos mistos, $0.038 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ para a ribeira de S. João, $0.037 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ para a ribeira de S. Luzia e $0.039 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ para a ribeira de J. Gomes, valores obtidos através de uma interpolação tendo em conta as percentagens de cada tipo de coberto. De seguida em “Main Chanel Bank” indica-se as margens à esquerda e à direita que limitam o canal. E finalmente em “Cont\Exp Coeffiicient” são inseridas as constantes que nomeiam o grau de contração e expansão elucidados pelo escoamento.

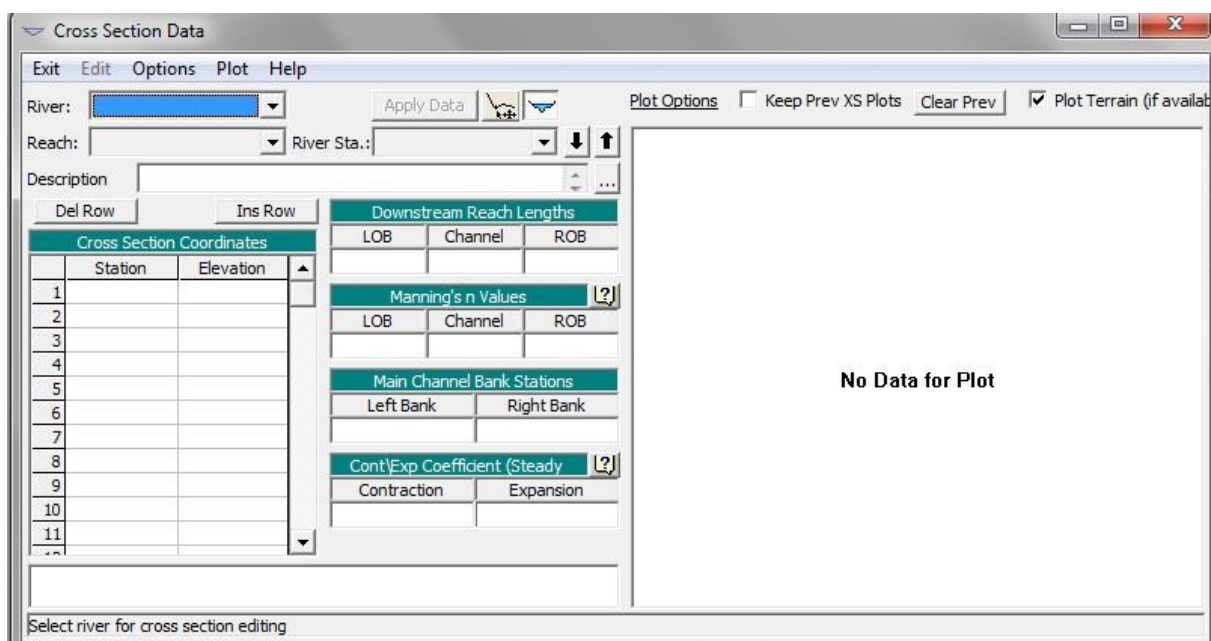


Figura 39 - Janela para editar as secções.

Após definidos todos os atributos atrás referidos, clica-se em “Apply Data” e na (Figura 39), surgirá a secção desenhada. Repete-se o processo para cada secção e, depois de finalizar, fecha-se a janela e guarda-se o ficheiro. Fica-se assim com a geometria definida.

Para caracterizar o canal por meio de certos parâmetros é preciso configurar a simulação por intermédio do botão “Edit/Enter steady flow data”. Na recente janela (Figura 66), introduz-se o número de perfis usados, o valor do caudal para cada secção, sendo igual para todas, e define-se as condições de fronteira, indo a “Reach Boundary Conditions”, seleciona-se a célula associada a “Upstream” e clica-se em “Critical Depth”, deixando em branco a opção “Downstream”, e logo depois guardar.

Na janela principal, clica-se em “Perform a steady flow simulation” e na recente janela (Figura 67) seleciona-se “supercritical” e depois clica-se em “Compute”.

Depois de concluída a simulação, pode-se obter os gráficos e tabelas com os valores necessários, através dos botões, “View cross sections”, “View profiles”, “View computed rating curves”, “View 3D multiple cross section plot”, “View summary output tables by profile”.

Folha de cálculo

Para determinar as curvas de regolfo, foi utilizada uma folha de cálculo em Exel, programada com linguagem de programação “Visual Basic”, tendo como suporte base outras folhas de cálculo existentes, oriundas das unidades curriculares de “Obras Marítimas e Fluviais” e “Hidráulica Urbana”. Logo de seguida é apresentado um fluxograma da folha de cálculo, que é, um processo iterativo, adotando o método das diferenças finitas com aproximações contínuas, até atingir a flexibilidade estabelecida.

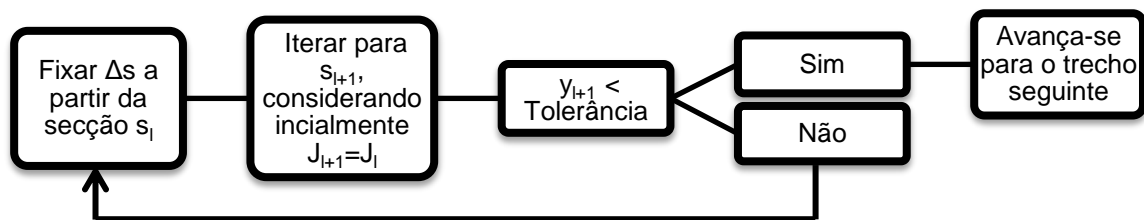


Figura 40 - Fluxograma da folha programada.

O grau de rugosidade mais conhecido como coeficiente de rugosidade, dá-nos o estado e a natureza encontrado no leito de um escoamento, é muito necessário face ao notável efeito que tem sobre o escoamento.

Para escoamento em regime uniforme com superfície livre, usa-se a seguinte forma:

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i} \quad (\text{eq. 61})$$

Sendo:

Q - caudal (m³/s);

A - área da secção transversal (m²);

R - raio hidráulico (m):

$$R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot h}{b + 2h} \quad (\text{eq. 62})$$

- Sendo que:

P - perímetro molhado da secção (m);

b - largura da secção retangular (m);

h - altura da superfície livre comparativamente à soleira do canal (m).

i - inclinação da soleira do canal ou perda de carga contínua, dependendo das alturas de água (reduzidas ou significativas) respetivamente;

n - o coeficiente de rugosidade ($m^{-1/3}s$), depende da natureza do canal, é encontrado nas tabelas técnicas.

4.1.2.2. Modelo reduzido

Instalações

O modelo reduzido foi executado no laboratório experimental e de aulas laboratoriais, das áreas de Hidráulica, Ambiente e Recursos Hídricos, do curso de Engenharia Civil, que pertence a Universidade da Madeira, situado no Edifício da Penteada.

Canal multifunções

Para esta modelação á escala é usado um canal multifunções (Figura 41) este equipamento oferece uma grande gama de experiências relacionadas com barragens, rios, canais e engenharia marítima. É apropriado para trabalhos práticos.



Figura 41 - Canal hidráulico.

Funcionando a base de um circuito fechado, este canal tem 2.5 m de comprimento 8,6 cm de largura e 30 cm de profundidade, as paredes laterais da secção são feitas em vidro temperado, permitindo uma fácil observação das experiências. Todos os acessórios que estão em contacto com a água são feitos em aço inoxidável, plástico e vidro, sendo resistentes à corrosão. A inclinação do canal pode ser ajustável (-0,5% ate +3%) com precisão de acordo com o pretendido, para permitir a simulação de inclinação da realidade e criar um fluxo uniforme. (Figura 42). O tanque principal do canal tem capacidade para 280 litros e funciona

de forma independente da rede de abastecimento, a bomba que permite o funcionamento do circuito fechado consome 1,02 kW podendo atingir um caudal máximo de sensivelmente 10 m³/h (Figura 42).

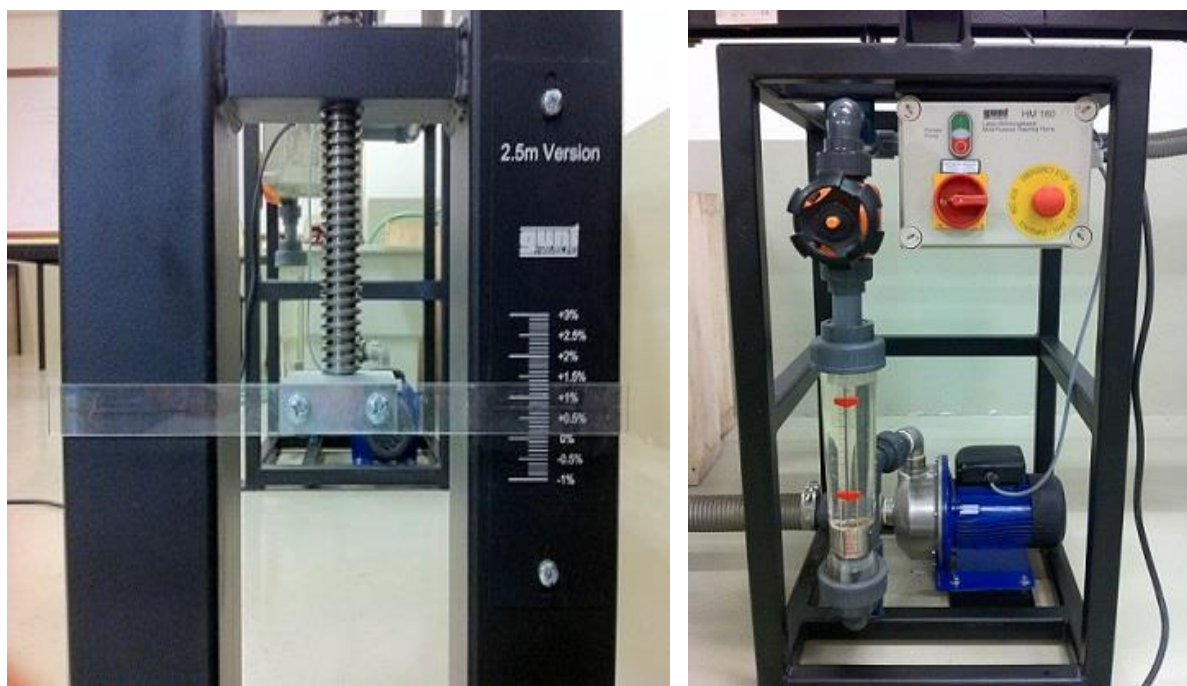


Figura 42 - Ajuste de inclinação, válvula de regulação de caudal e bomba centrífuga.

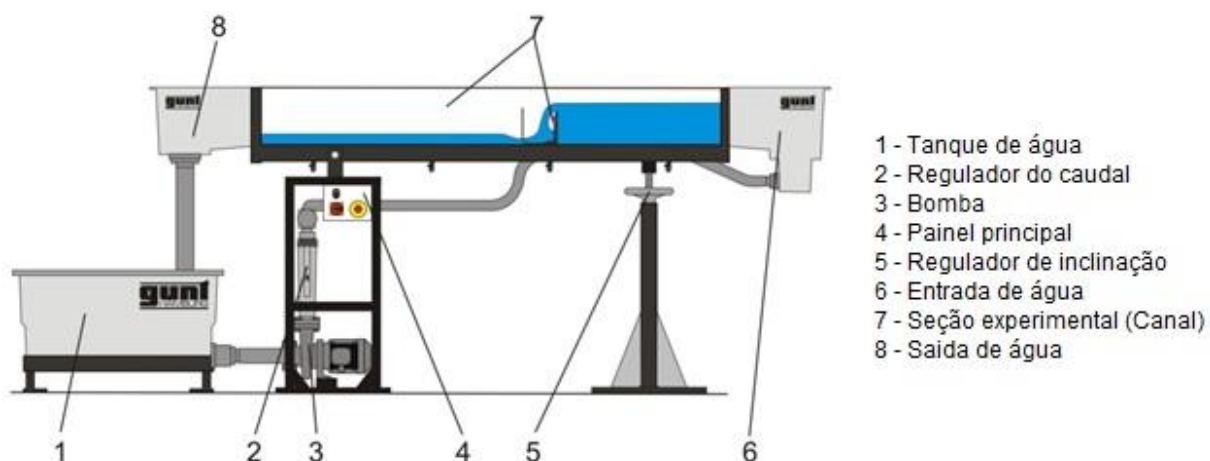


Figura 43 - Canal hidráulico, especificações.

A regularização do caudal é feita por uma válvula acomodada na conduta de compressão da bomba, a secção do canal a montante recebe a água oriunda do tanque de armazenamento mediante uma grelha que reduz a agitação do escoamento, permitindo assim a criação de uma zona de amortecimento e a secção a jusante recebe a água que retribui ao tanque.

Existem vários acessórios disponíveis para aplicação no canal hidráulico, como por exemplo descarregadores, elementos de extensão, etc. Um dos acessórios indispensáveis neste equipamento é o indicador de nível, usado para medição do nível de água no canal. Este acessório pode ser montado em qualquer secção do canal e permite a medição do nível de água ao longo da sua dimensão.

Este acessório é composto por uma régua, com uma referência de medição em “mm” a variar entre os 0.05 até os 260 mm, e por uma peça de plástico com uma marcação de nível que, quando alinhada com a medição na régua, possibilita obter o valor de altura de água na secção. Os quatro parafusos que se encontram na base permitem fixar o acessório ao canal.

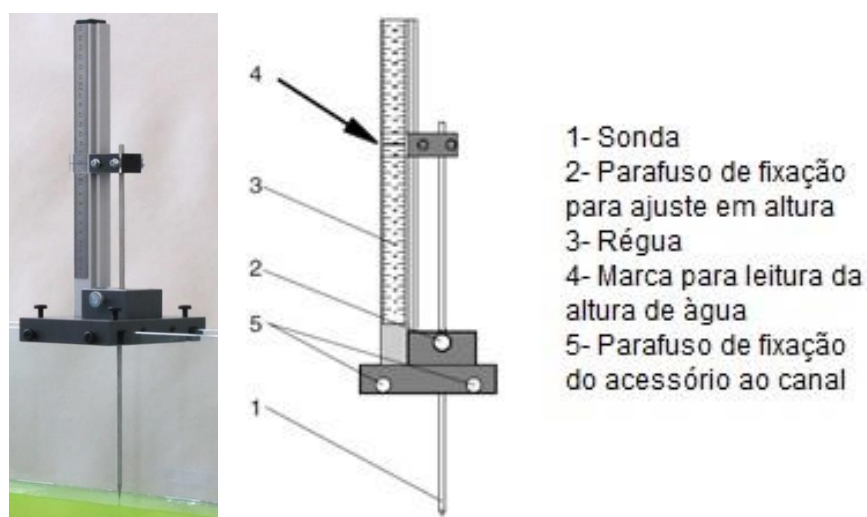


Figura 44 - Indicativo de nível.

Outros dos acessórios usados neste equipamento é a relva artificial e o enrocamento (seixo), ambos tratam o coberto vegetal, rochas, inertes e material grosseiro encontrado no fundo das ribeiras do concelho do Funchal.



Figura 45 - Relva artificial.



Figura 46 - Enrocamento natural.

Procedimento experimental laboratorial

Para iniciar este procedimento experimental ajusta-se a inclinação do canal multifunções para o valor desejado, dependendo para cada caso (ribeira). Depois de ligar a bomba, abre-se lentamente a válvula de controlo do caudal até atingir o valor desejado.

De seguida vemos que o escoamento tenta a estabilizar e so depois é que mede-se as alturas de água para os intervalos estabelecidos, 9, 41, 91, 141, 191 e 241 cm desde o início da entrada de água no canal. Devido à dimensão do canal só podemos iniciar as medições a partir dos 9 cm, por isso é que iniciamos nestes termos. Deste modo, o nosso canal apenas possui 2,32 m efetivos para medições de altura de água. Nestas experiências foram medidas as alturas de água para as diferentes situações previstas no fundo das ribeiras e previamente definidas, ou seja, para cada uma das ribeiras foram selecionadas três secções diferentes entre si, uma secção só com relva artificial para simular a vegetação encontrada nesse trecho, outra secção só com inertes para simular as rochas encontradas no canal e uma outra mista com intervalos de relva artificial e inertes. Foram realizados três ensaios para cada secção num total de nove por ribeira e vinte e sete no total das três ribeiras. Depois foi calculado o raio hidráulico, R , e anotado, podendo deste modo calcular o coeficiente de rugosidade, n , através da (eq. 61), explicitando-a em ordem a n .



Figura 47 - Canal multifunções com indicador de nível.

Existem problemas previstos entre o caso real e o modelo reduzido (canal multifunções), mencionados na ANEXO 2 Tabela 28 apresentada em anexo.

O valor da altura de água, para efetuar os cálculos e para os pontos referenciados no canal, é a média dos valores obtidos entre os três ensaios realizados. Em anexo, são apresentados os valores para as ribeiras de S. João, S. Luzia e J. Gomes. Todos os parâmetros são determinados através das respetivas fórmulas, exceto a altura de água (leituras), comprimento, largura e inclinação do canal (dados) e caudal (calculado anteriormente).

É importante salientar que o coeficiente de rugosidade das paredes e do fundo do canal são distintos, o valor de n obtido na experiência representa assim uma média ponderada. Portanto para diferentes condições experimentais, conseguimos obter diferentes valores de n ; devendo-se ao facto da acção das paredes, aumentar com a altura do escoamento, e assim, com a variação da secção.

Efeitos da redução geométrica

As relações dos vários parâmetros obtidos entre os dois casos, modelo e programa HEC-RAS (caso real), são as seguintes:

Tabela 22 - Relações entre o caso real e o modelo.

Relação	S. João Rochas	S. João Misto	S. João Vegetação	S. Luzia Rochas	S. Luzia Misto	S. Luzia Vegetação	J.Gomes Rochas	J.Gomes Misto	J. Gomes Vegetação
Q_r/Q_m	118914	118914	118914	118893	118893	118893	118959	118959	118959
b_r/b_m	116.279	116.279	116.279	116.279	116.279	116.279	116.279	116.279	116.279
L_r/L_m	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Ks_r/Ks_m	1.310	1.205	1.132	1.314	1.319	1.179	1.469	1.531	1.322
U_r/U_m	17.830	18.168	18.128	19.426	18.263	19.553	21.185	20.281	21.103
J_r/J_m	1.533	1.706	1.363	2.035	1.838	1.254	2.964	2.695	2.417

Sendo:

Q - caudal;

b - largura do canal;

L - comprimento do canal;

Ks - coeficiente de rugosidade;

U - velocidade;

J - perda de carga unitária;

r- caso real;

m - modelo reduzido.

Os valores exibidos na tabela anterior, para o coeficiente de rugosidade, velocidade de escoamento e perda de carga unitária, são referentes a um valor médio.

Nos modelos numéricos o valor do comprimento do canal não tem qualquer influência na análise, no que diz respeito a efeitos de redução geométrica. Já no caso do modelo reduzido, a relação entre o modelo e o caso real pode ter consequências nos resultados obtidos através do mesmo, mas observando os resultados apresentados no subcapítulo seguinte, os quais são semelhantes aos obtidos para os restantes métodos, pode-se afirmar que os efeitos da redução, são pouco relevantes.

Assim, se forem assegurados no modelo, para certos caudais significativos, certas condições, podemos menosprezar os efeitos de escala:

- Para os escoamentos turbulentos, no modelo e no caso “real”, se verificarmos que os valores de Reynolds estão acima da zona de transição, do escoamento laminar para turbulento, ainda que diferentes, a semelhança é satisfatória;
- Quando as dimensões das secções transversais do escoamento são reduzidas, largura superior a 8 ou 10 cm e profundidade de escoamento superior a 2 cm, os efeitos de escala, são pouco importantes.

4.2. Tratamento de Resultados

Neste subcapítulo são expostos os resultados correspondentes a análise do escoamento efetuado através da folha de cálculo programada Excel, do programa HEC-RAS e do modelo reduzido, para a ribeira de São João, caso Misto, referidos na Tabela 23. As restantes secções estudadas Vegetação e Rochas, para esta ribeira e para cada um dos troços das outras ribeiras, Santa Luzia e João Gomes, seguem o mesmo procedimento e, por isso, são remetidas para o Anexo 2.

Os resultados para o tramo regularizado de 23.2 m da ribeira de São João, alcançados através da folha de cálculo programada Excel e do programa HEC-RAS são muito idênticos, indicando que, para a secção estudada, caudal médio de 313.801 m³/s, inclinação de 3% e coeficiente de Manning de 0.035 (fundo do canal com vegetação), apresenta valores de Froude maiores que 1 e números de Reynolds superiores a 5000, expressando, que o escoamento é rápido e turbulento.

Nos resultados alcançados através do modelo reduzido, com base no valor do coeficiente de rugosidade, podemos observar graficamente pequenas diferenças, comparando com os alcançados pelos outros dois métodos, visto que uma elevação do fundo do canal nessa

secção final originou um abrandamento do escoamento. Apesar de tal diferença, os resultados obtidos são satisfatórios, revelando um igual tipo de escoamento, rápido e turbulento.

Tabela 23 - Resultados para a secção da ribeira de São João - Misto.

Trecho de 23.2 m da ribeira de São João - Misto									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.603	313.801	6.818	0.03	0.032	1.015	16177729.050
Jusante	23.2	10	2.716	313.801	11.553	0.03	0.028	2.239	20132432.630
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.64	313.801	6.763	0.03	0.038	1.003	16114837.106
Jusante	23.2	10	2.95	313.801	10.637	0.03	0.038	1.978	19540506.881
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0737	9.5	0.417	0.03	0.038	0.490	11197.548
Jusante	2.32	0.086	0.0567	9.5	0.541	0.03	0.027	0.727	13107.498
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.238	313.801	7.473	0.03	0.053	1.160	16970106.817
Jusante	23.2	10	3.260	313.801	9.715	0.03	0.037	1.719	18979256.833

Analisando a tabela anterior verifica-se que o número de Froude, bem como o de Reynolds aumentam de montante para jusante, uma vez que o escoamento torna-se cada vez mais rápido e turbulento, o que vai ao encontro do expectável, podemos também verificar o aumento da velocidade de escoamento, de montante para jusante, mas de forma inversa verifica-se o comportamento das alturas de água que diminuem de montante para jusante, sendo já previsível. Em relação ao coeficiente de rugosidade, este tem um decréscimo de montante para jusante, exceto no programa HEC-RAS, visto ter sido atribuído o mesmo valor para as duas secções. Este comportamento é igual para os três tipos de fundo, bem como para as restantes ribeiras de Santa Luzia e João Gomes.

De seguida são apresentados os gráficos relativos à ribeira de São João para o tipo de fundo misto, os quais incluem a linha de energia (E), a cota da superfície livre (Y), a cota do fundo (Z) e o coeficiente de rugosidade (Ks). Os restantes tipos de fundo e ribeiras são submetidos para o Anexo 2.

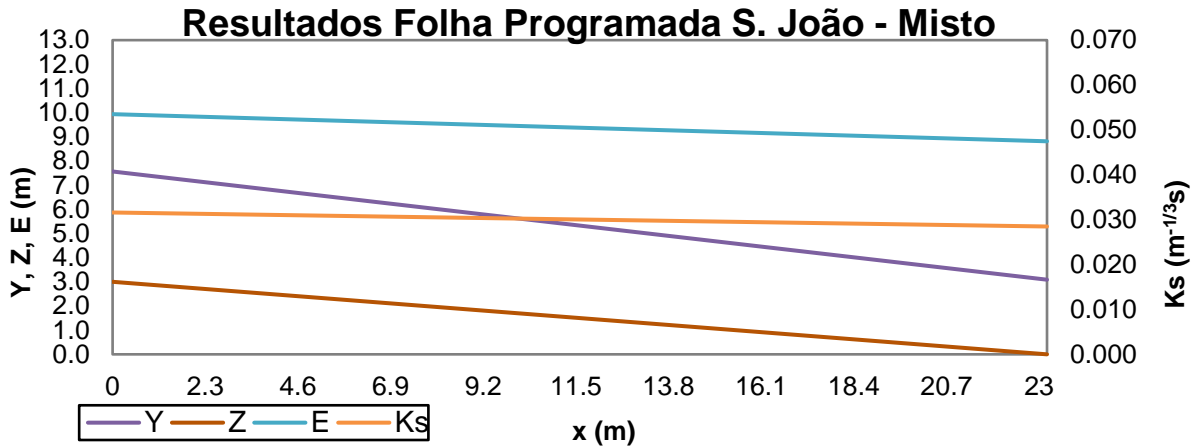


Figura 48 - Folha programada S. João - Misto.

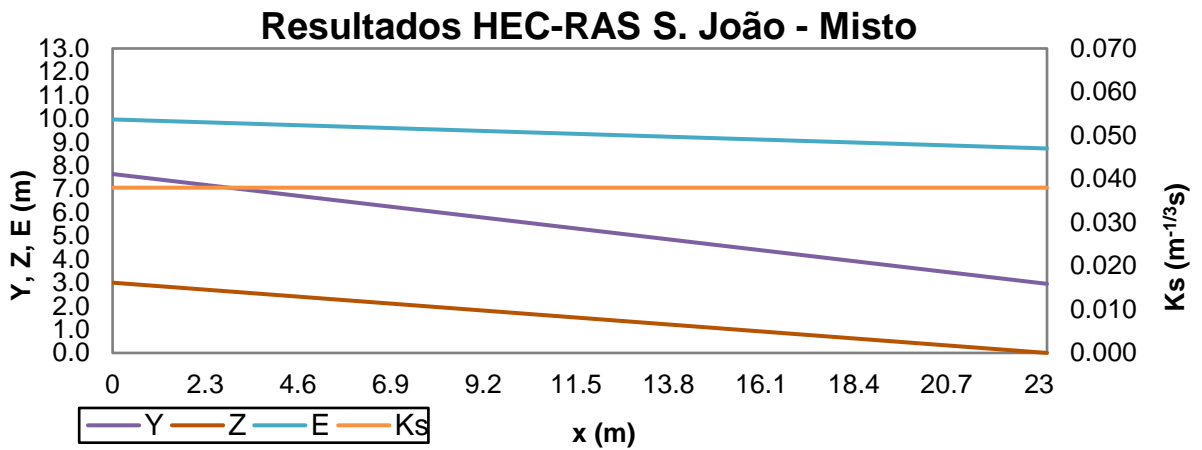


Figura 49 - Programa HEC-RAS S. João - Misto.

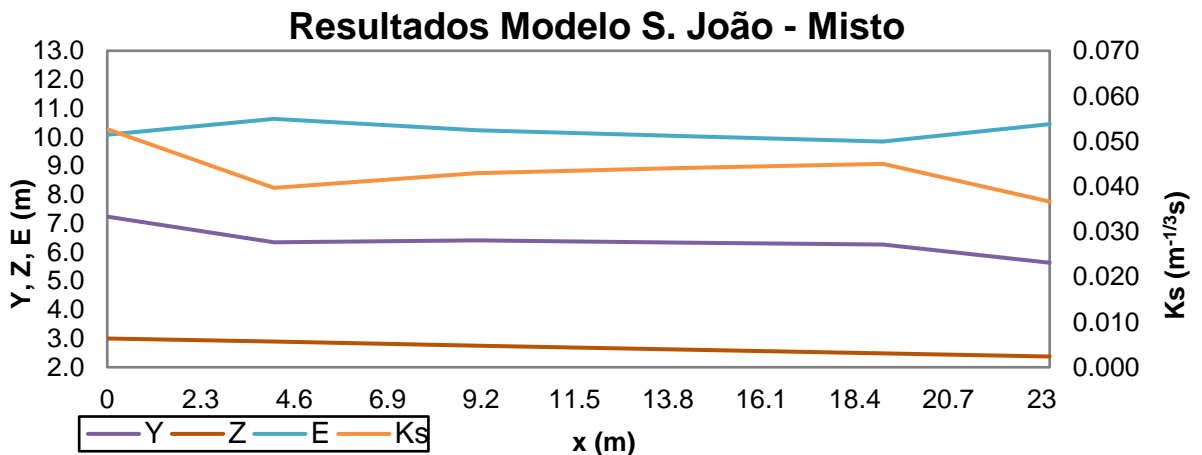


Figura 50 - Modelo transformado S. João - Misto.

Analisando os gráficos para os três procedimentos de estudo, tanto a cota de fundo, a cota da superfície livre e a linha de energia diminuem progressivamente de montante para jusante,

exceto no modelo reduzido, que se pode observar em relação à linha de energia uma oscilação inversa do coeficiente de rugosidade, mantendo-se com a tendência decrescente os restantes parâmetros analisados.

Quanto ao coeficiente de rugosidade, tanto na folha programada, como no modelo reduzido, diminui como já era de prever, de montante para jusante. No programa HEC-RAS, o mesmo coeficiente mantém-se constante ao longo do tramo todo, uma vez que o mesmo foi atribuído a cada secção.

Vamos agora analisar a relação/variação do coeficiente de rugosidade para os casos de, (caudal de ponta de cheia, 75% do caudal de ponta de cheia, 50% do caudal de ponta de cheia e 25% do caudal de ponta de cheia) para a ribeira de São João e tipo de fundo misto. Os restantes tipos de fundo e ribeiras são submetidos para o Anexo 3.

Em seguida são apresentados os gráficos representativos da variação acima descrita.

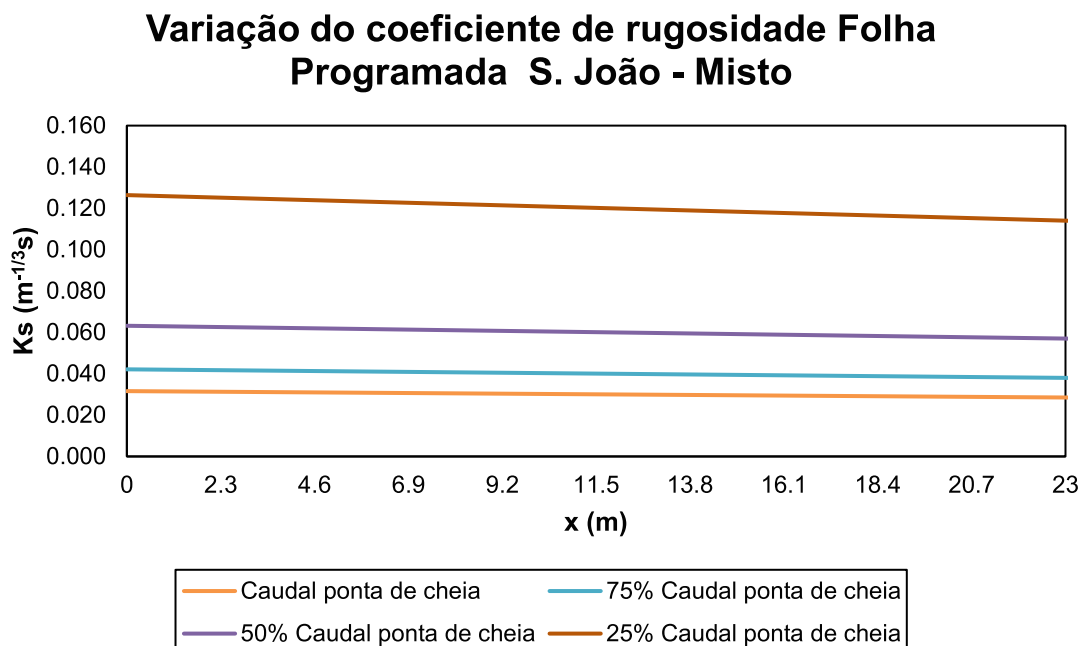


Figura 51 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. João - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Misto

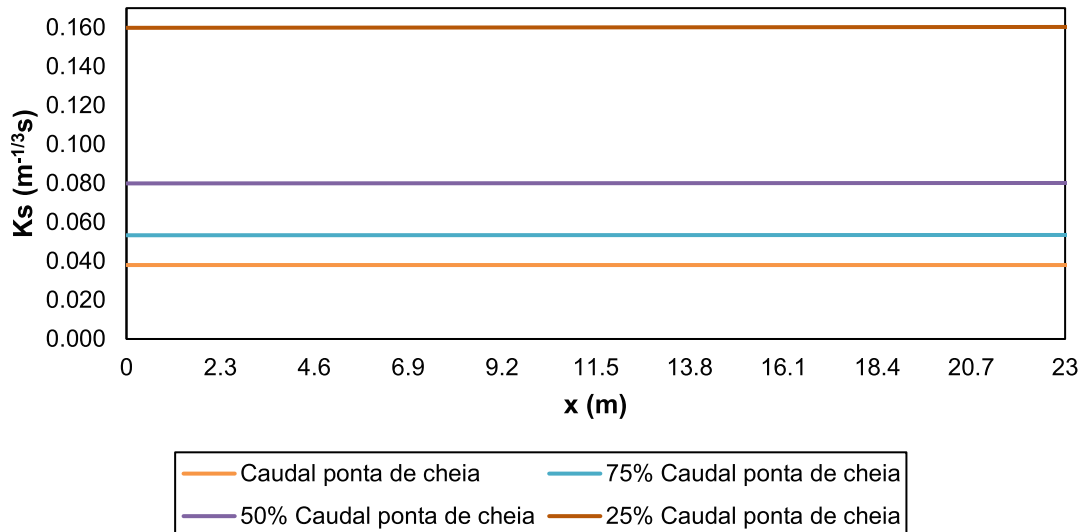


Figura 52 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo S. João - Misto

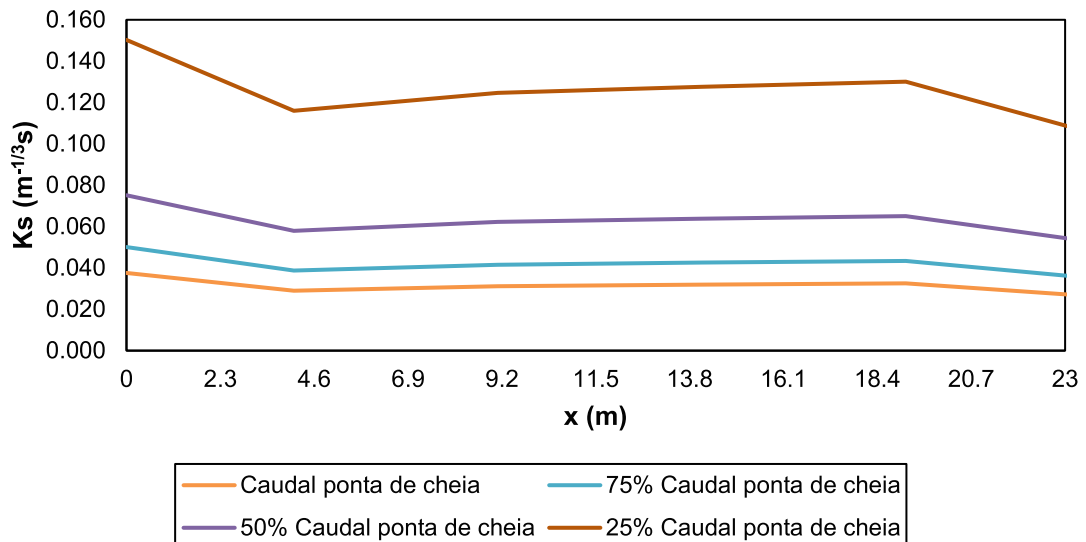


Figura 53 - Coeficiente de rugosidade modelo S. João - Misto.

Os gráficos mostram, para o coeficiente de rugosidade, tanto na folha programada, como no modelo reduzido, uma diminuição para os diferentes caudais de ponta de cheia, de montante

para jusante, mas para o programa HEC-RAS, o mesmo coeficiente mantém-se constante durante todo o tramo.

Variação do coeficiente de rugosidade Média S. João - Misto

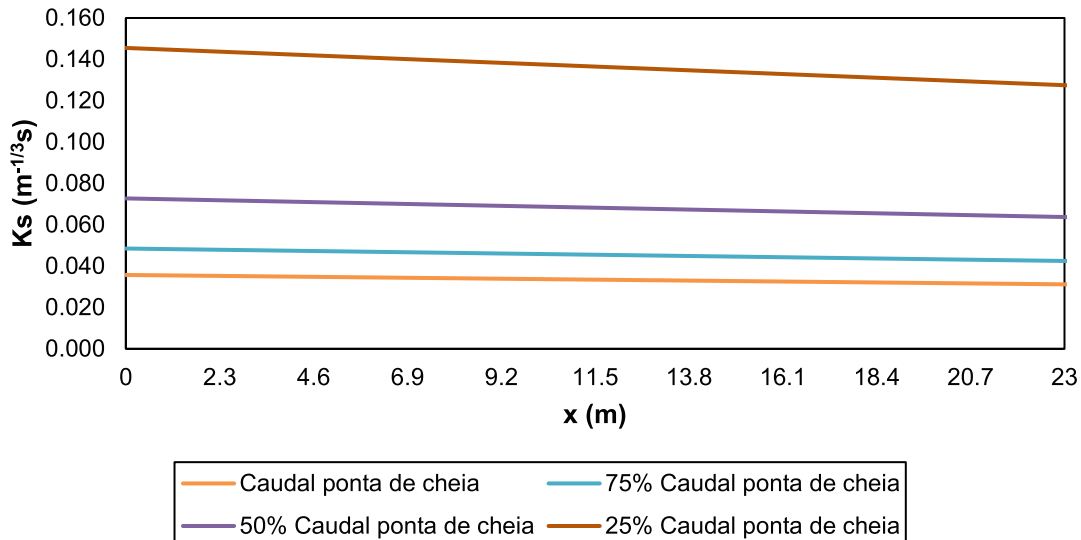


Figura 54 - Coeficiente de rugosidade média S. João - Misto.

Observando os gráficos da média das três formulações, para o tipo de fundo misto, podemos afirmar que é normal, haver um aumento do coeficiente de rugosidade, diretamente proporcional, em relação ao decréscimo do caudal, uma vez que a velocidade diminui e existe mais atrito entre o fluido, o fundo e as paredes do canal. Tanto para o tipo de fundo em vegetação, como em rochas, o coeficiente de rugosidade comporta-se de forma idêntica.

Logo de seguida é apresentada uma tabela que contém os valores da dimensão da secção, dos caudais de ponta de cheia, das velocidades correspondentes, do declive e dos coeficientes de rugosidade, de maneira a expor os resultados obtidos através da média que foi apresentada no gráfico da Figura 54, e que serão analisados e comentados no parágrafo seguinte.

Tabela 24 - Ceficiente de rugosidade para os diferentes caudais de ponta.

Caudal ponta de cheia						
Secção	L (m)	b (m)	Q (m3/s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m-1/3s)
Montante	0	10	313.801	6.818	0.03	0.036
Jusante	23.2	10	313.801	11.553	0.03	0.031
75% Caudal ponta de cheia						
Secção	L (m)	b (m)	Q (m3/s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m-1/3s)
Montante	0	10	235.351	5.114	0.03	0.049
Jusante	23.2	10	235.351	8.665	0.03	0.042
50% Caudal ponta de cheia						
Secção	L (m)	b (m)	Q (m3/s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m-1/3s)
Montante	0	10	156.901	3.409	0.03	0.073
Jusante	23.2	10	156.901	5.776	0.03	0.064
25% Caudal ponta de cheia						
Secção	L (m)	b (m)	Q (m3/s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m-1/3s)
Montante	0	10	78.450	1.705	0.03	0.146
Jusante	23.2	10	78.450	2.888	0.03	0.127

Estes resultados já eram de esperar e têm um procedimento semelhante para as três ribeiras e respetivos tipos de fundos. O valor do coeficiente escolhido anteriormente através da Tabela 11, $0.038 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ para o tipo de fundo misto, é a referência e termo de comparação dos nossos resultados. Para o caudal de ponta de cheia obteve-se o valor de $0.036 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, muito idêntico ao adotado, significa que temos um regime rápido, não existindo um elevado atrito entre as superfícies e o fluido, para 75% do caudal de ponta de cheia obteve-se o valor de $0.049 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, ligeiramente superior ao adotado, ou seja, o coeficiente tende a subir, quando o caudal diminui. Quando o caudal de ponta de cheia baixa para os 50% o valor retirado é de $0.073 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, e finalmente para a situação mais distinta, 25% do caudal de ponta de cheia, foi atingido o valor de $0.146 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, o mais alto entre os caudais, porque cada vez mais a velocidade do escoamento diminui, conduzindo assim a uma proporcionalidade direta entre os parâmetros.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

O principal objetivo da presente dissertação é a caracterização do coeficiente de rugosidade e o seu efeito no escoamento em canais naturais. No decorrer da realização desta, foram adoptados vários métodos para os objetivos propostos, cumprindo assim com os pressupostos pré-estabelecidos.

As fórmulas usadas para o cálculo dos tempos de concentração e dos caudais foram uma grande vantagem, e devido à sua facilidade de aplicação, mas em contraponto a sua limitação para determinadas condições de fronteira (áreas de bacias e valores de precipitação) tornou-se num pequeno handicap.

A análise através dos métodos da folha de cálculo, programa HEC-RAS e o modelo reduzido, foram bem realizadas para todas as secções em estudo, para a situação de caudal de ponta de cheia, e período de retorno de 100 anos o escoamento foi identificado como rápido e turbulento, mas para as restantes situações de 75%, 50% e 25% de caudal de ponta de cheia, o escoamento alterou-se para lento e turbulento, apresentando em geral resultados realistas. Há que referir que no modelo reduzido, no canal multifunções, o escoamento é lento para todas as situações. Apesar de ter sido identificado um defeito no canal, uma vez que houve um grande decréscimo na altura de água no final, deveria diminuir progressivamente, pode ser observado nos gráficos referentes ao modelo, com a linha do coeficiente de rugosidade a sofrer uma descida no final ou seja, um aumento da velocidade do escoamento, os resultados foram globalmente satisfatórios.

A utilização de modelos físicos é muito útil na determinação de fenómenos hidráulicos, a principal vantagem é permitir reproduzir os mesmos fenómenos sem as simplificações intrínsecas aos modelos analíticos, sendo a sua principal desvantagem o seu elevado custo.

Resposta aos quatro objetivos a serem atingidos, mencionados no início da dissertação:

- A criação de uma folha de cálculo programada para determinar as curvas de regolfo, apenas limitada a trechos retangulares com inclinações e caudais constantes, estas limitações foram superadas com o uso do programa HEC-RAS, que permite uma maior variedade de análises em relação à folha de cálculo. Outra diferença entre estas duas formulações é o número de secções intermédias do canal a estudar, em que a folha de cálculo é mais eficaz que o programa HEC-RAS;

- A utilização de um canal multifunções para simulação hidrodinâmica, considerando diferentes coeficientes de rugosidade, que permitiu a análise com resultados satisfatórios tendo em conta a redução de escala; a principal vantagem é a visualização em tempo real da evolução do escoamento e a simulação da presença de vegetação e rochas no fundo do canal, oferecendo uma perspectiva que não seria possível através dos modelos numéricos;
- A comparação dos diferentes resultados obtidos entre os coeficientes adotados e estimados, analisados através dos gráficos originários das folhas de cálculo e do programa HEC-RAS, em relação aos coeficientes de rugosidade, podemos referir que não existem muitas diferenças entre os valores adotados e os valores estimados, o que já era expectável, havendo uma ligeira variação do coeficiente de rugosidade para o caso de 25% do caudal de ponta de cheia para os três tipos de fundos, desta maneira podemos referir que a experiência mostra que a análise dos diversos resultados oferece uma boa oportunidade de verificação dos parâmetros pretendidos;
- De modo a ser produzida uma boa análise e controle para dimensionamento de obras hidráulicas mais especificamente em canais naturais, tem de ser feita uma boa correspondência e relação entre coeficientes de rugosidade, de modo a otimizar a criação de projetos hidráulicos e não esquecendo uma boa monitorização a quando do seu estado de utilização.

5.2. Aspetos a melhorar para trabalhos futuros

Nesta dissertação, visou-se entender o comportamento do coeficiente de rugosidade, de modo a desenvolver um conhecimento mais aprofundado num estudo semelhante, sujere-se os vários aspetos a melhorar:

- Uso de mais bibliografia direcionada para as características hidráulicas consideradas;
- Otimização das folhas de cálculo criadas no decurso desta dissertação;
- Otimizar as capacidades do programa HEC-RAS;
- Estudar um número mais elevado de secções, de modo a obter uma melhor evolução ao longo de todo o comprimento do canal analisado.

BIBLIOGRAFIA

- Camacho, R. F. (2015). *Caracterização, Simulação (à escala) e Modelação do Escoamento em Canais Artificiais. Aplicação a caso de estudo*. Universidade da Madeira.
- Carvalho, D. F., & Silva, L. D. (2006). *Hidrologia*.
- Chow, V. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Cirilo. (2001). *Tabelas Coeficientes de Manning*.
- Conde, R. A. (2007). *Análises de sensibilidade em modelação numérica de escoamentos em leito móvel com HEC-RAS. Aplicação ao rio Mondego*. Instituto Superior Técnico.
- Correia, C. M. (Maio de 2007). Boas Práticas para Ocupação do Solo, no respeito pelos Recursos Hídricos. *Corredores Ribeirinhos e Controlo de Cheias e de Áreas Inundadas em Pequenas Bacias Hidrográficas*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo.
- Eduardo Paula, F. M. (2014). *Conceitos de bacias hidrográficas*.
- Fernandes, R. d. (2008). *Regimes de escoamentos*. Universidade Regional do Cariri – URCA.
- Ferreira, A. L. (2010). *Caracterização morfométrica das bacias hidrográficas e áreas inundáveis no concelho de Pombal*. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Fragoso, C. (2014). *Bacia Hidrografica*.
- França, J. A., & Almeida, A. B. (2003). *Plano regional de água da Madeira. Síntese do diagnóstico e dos objectivos*.
- Lencastre, A., & Franco, F. M. (2006). *Lições de Hidrologia 3ª edição revista*. Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Lima, A. G. (2009). *Hidrologia*.
- Lousada, S. A. (2014). *Apontamentos da Unidade Curricular de Obras Marítimas e Fluviais do Mestrado em Engenharia Civil*. Funchal, Madeira: Universidade da Madeira.
- Mano, E. R. (Fevereiro de 2008). Estudo de Bacias de Retenção como solução para situações crescentes de urbanização. *Dissertação de Mestrado*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Manzanares, A. (1980). *Hidráulia Geral II. Técnica*. Lisboa: AEIST.
- Martins, C. M., Mendes, M. d., Abreu, J. M., Almeida, J. P., Lima, J. P., & Lima, I. P. (2010). Curso técnico n.º 1: Hidrologia urbana - Conceitos básicos. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. Universidade de Coimbra.
- Martins, F. J. (2000). *Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Inferiores Rodoviárias para Águas Pluviais*.

- Mata-Lima, H. (2007). *Hidráulica, Hidrologia e Recursos Hídricos. Apontamentos de apoio à unidade curricular*. Funchal: Universidade da Madeira.
- Mata-Lima, H., Vargas, H., Carvalho, J., Gonçalves, M., Caetano, H., Marques, A., & Raminhos, C. (2007). Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um caso de estudo. *Revista Escola de Minas*, 60 nº3. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Methods, H., & Durrans, S. R. (2003). *Stormwater Conveyance Modeling and Design*. Waterbury: Haestad Press.
- Milani, R. (2014). *Caracterização ambiental L – Bacias hidrográficas*.
- Oliveira, R. P., Almeida, A. B., Sousa, J., Pereira, M. J., Portela, M. M., Coutinho, M. A., . . . Lopes, S. (s.d.). *A avaliação do risco de aluviões na ilha da Madeira*. IST, UMa & LREC.
- Pelaez, J. R. (1978). *Calculo Hidrometeorologico de Caudales Maximos en Pequeñas Cuencas Naturales*. Espanha: Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo.
- Pinto, D. J. (2010). *Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta*.
- Prada, S. (2013). *Apontamentos da Unidade Curricular de Hidrologia, Recursos Hídricos e Ambiente da Licenciatura em Engenharia Civil*. Funchal, Madeira: Universidade da Madeira.
- Quintela, A. C. (1981). *Hidráulica, 2ª Edição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Rodrigues, C. M., Moreira, M., & Guimarães, R. C. (2010). *Apontamentos para as aulas de Hidrologia*. Brasil.
- Silva, S. A. (2013). *Obras de Desvio Provisório. Conceção, Dimensionamento e Adaptação para Obras Definitivas*. Lisboa: Instituto Técnico de Lisboa.
- Silveira, A. (2005). *Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.
- Soares, D. P. (2013). *Fotogeologia - Fatores Guia na Interpretação Fotogeológica*.
- Suárez, Y. V. (2000). *Estudo da resistência ao escoamento em canais de fundo fixo*.
- Tomaz, P. (2011). *Curso de Manejo de águas pluviais, Capítulo 50- Fórmula de Manning e canais*.
- Wright-McLaughlin. (1969). *Urban Storm Drainage Criteria Manual*. Denver, Colorado: Prepared for the Denver Regional Council of Governments.

ANEXOS

ANEXO 1

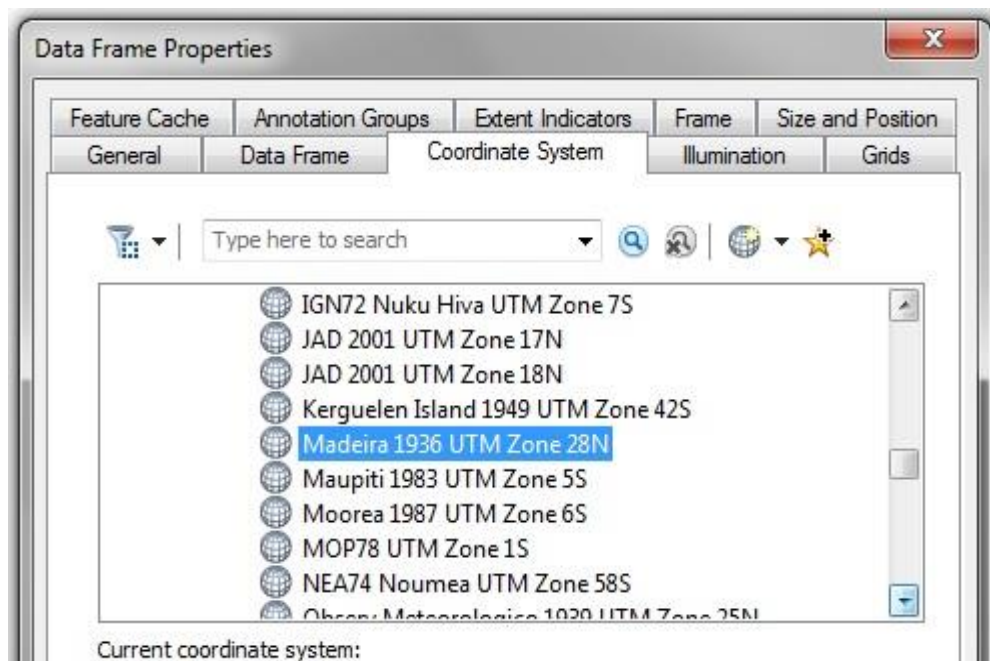


Figura 55 - Sistema de coordenadas.

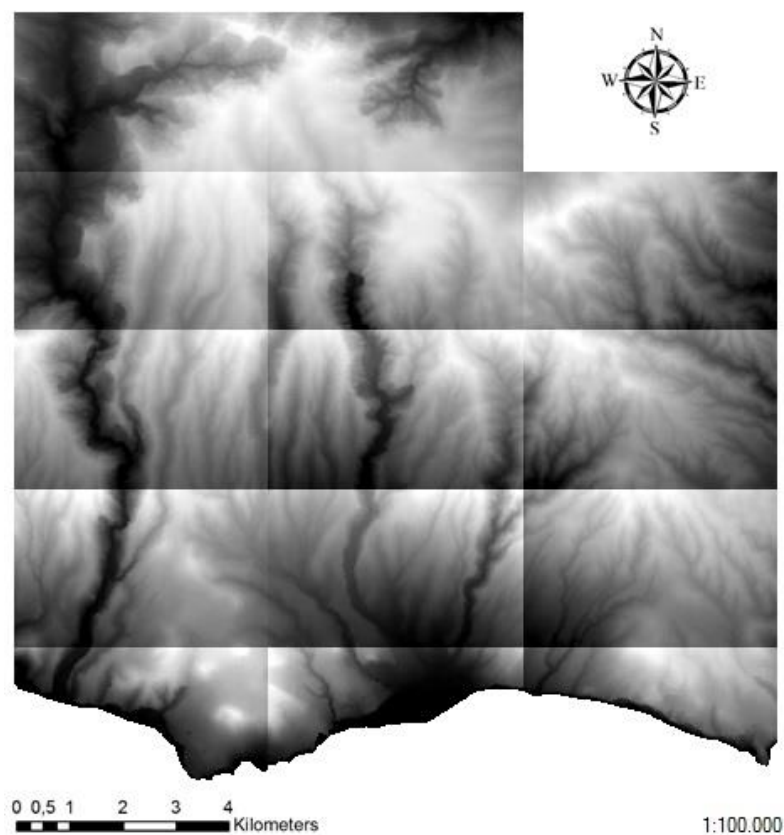


Figura 56 - Inserção dos ficheiros “.asc”.



Figura 57 - União dos ficheiros “.asc”.

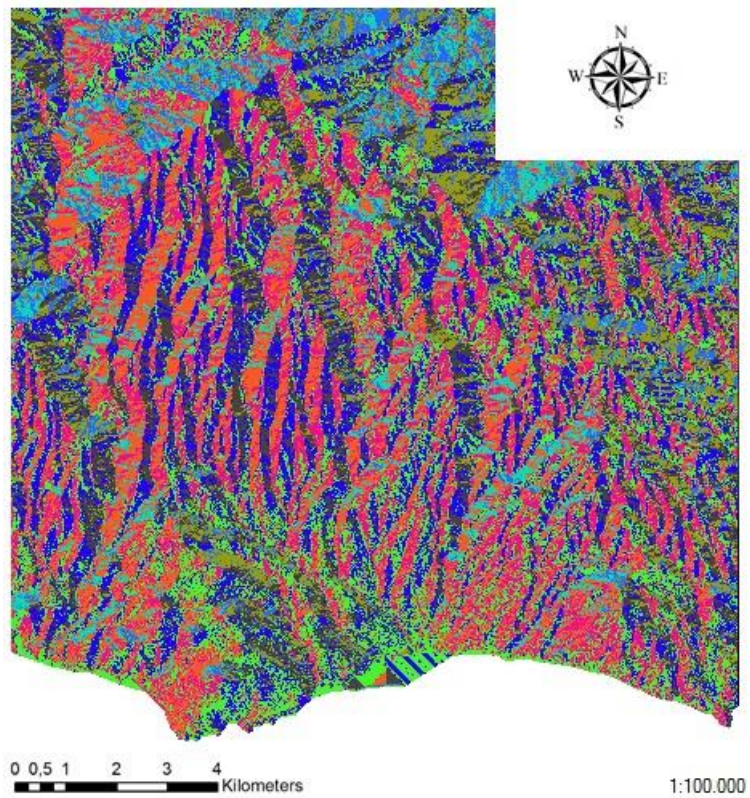


Figura 58 - Comando “Flow direction”.

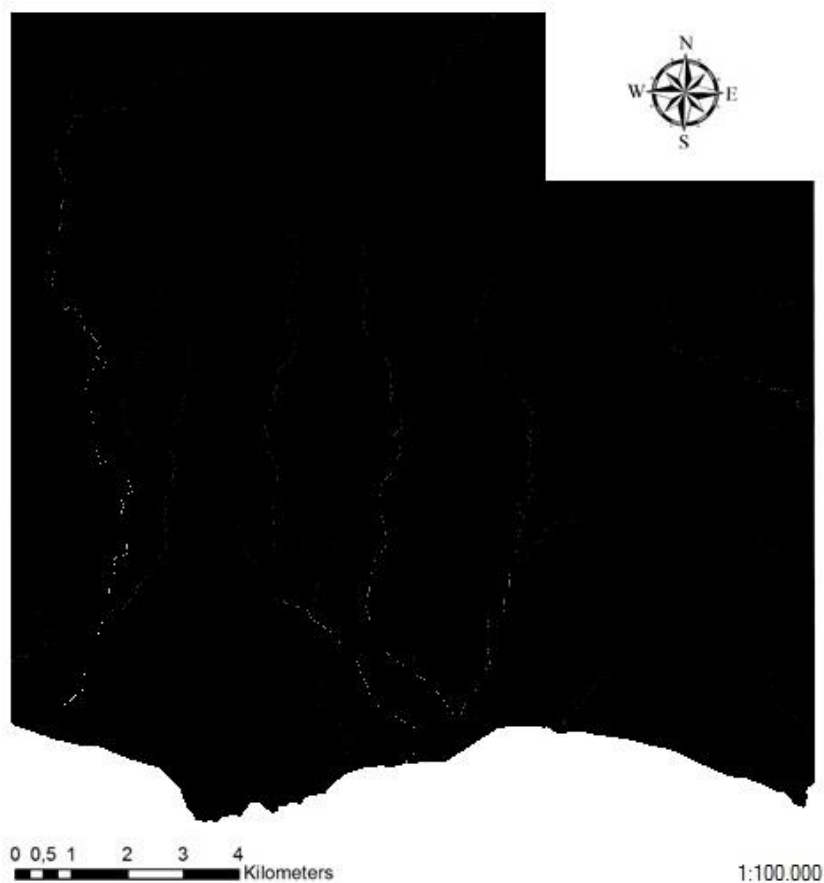


Figura 59 - Comando “Flow accumulation”.

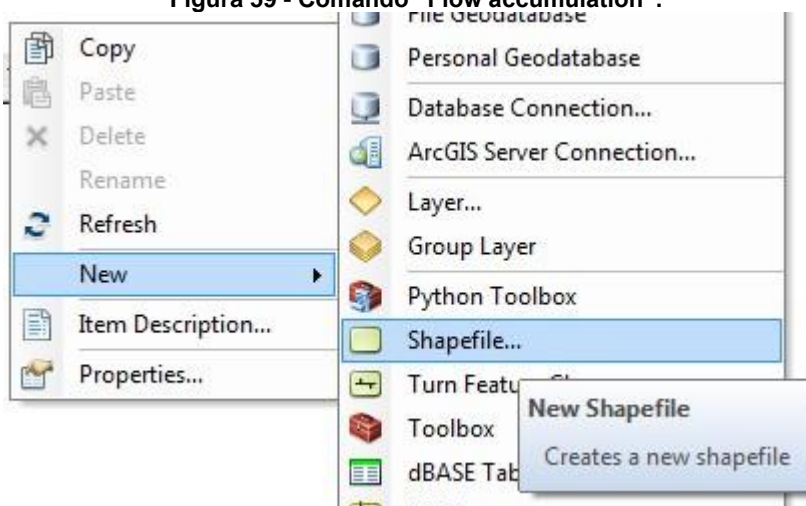


Figura 60 - Criação novo “shapefile”.

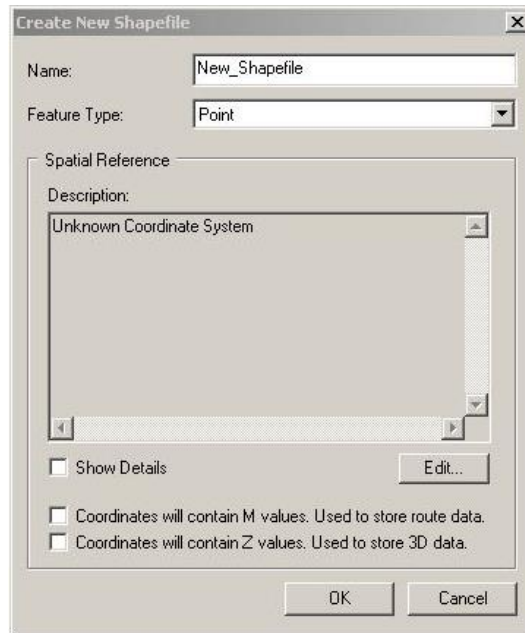


Figura 61 - Criação novo "shapefile".

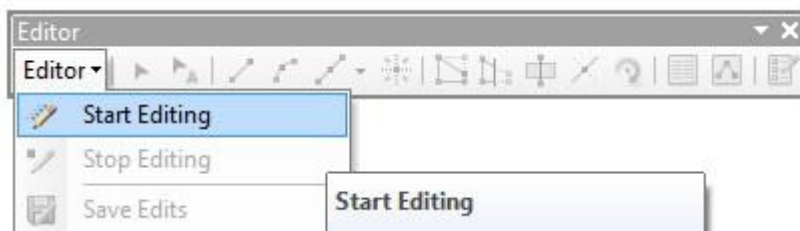


Figura 62 - Barra "Editor".

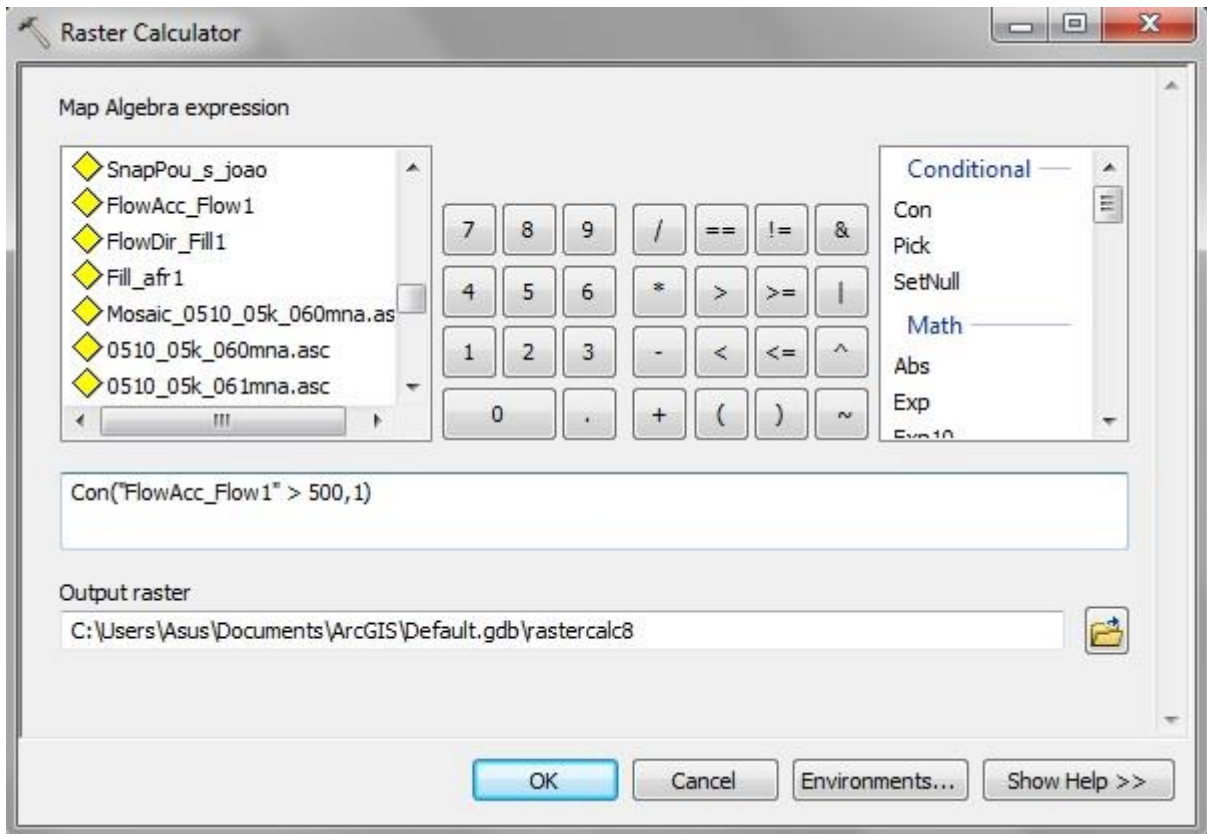


Figura 63 - Janela do Raster Calculator.

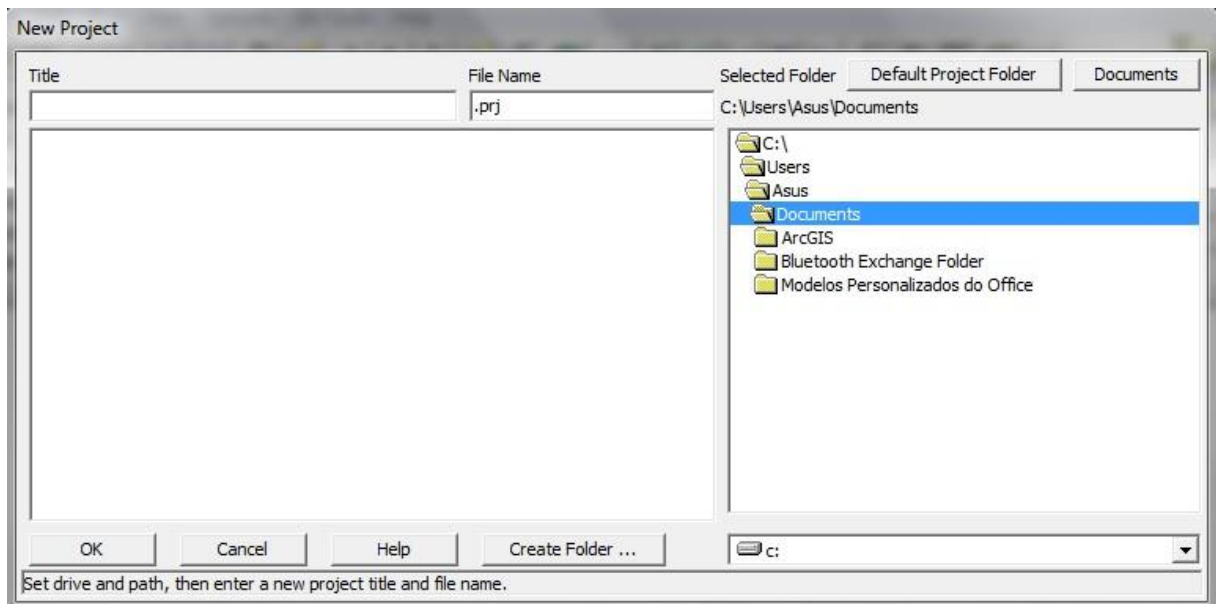


Figura 64 - Iniciar novo projeto.

Anexos

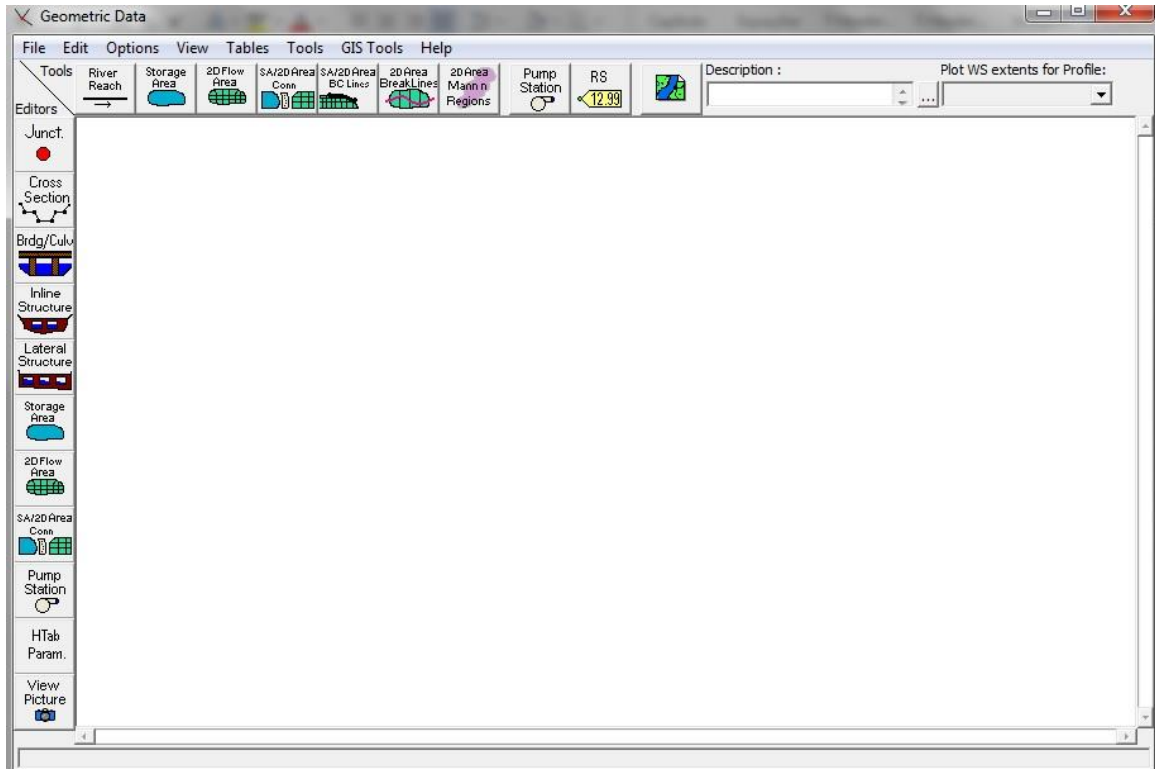


Figura 65 - Editar geometria do canal.

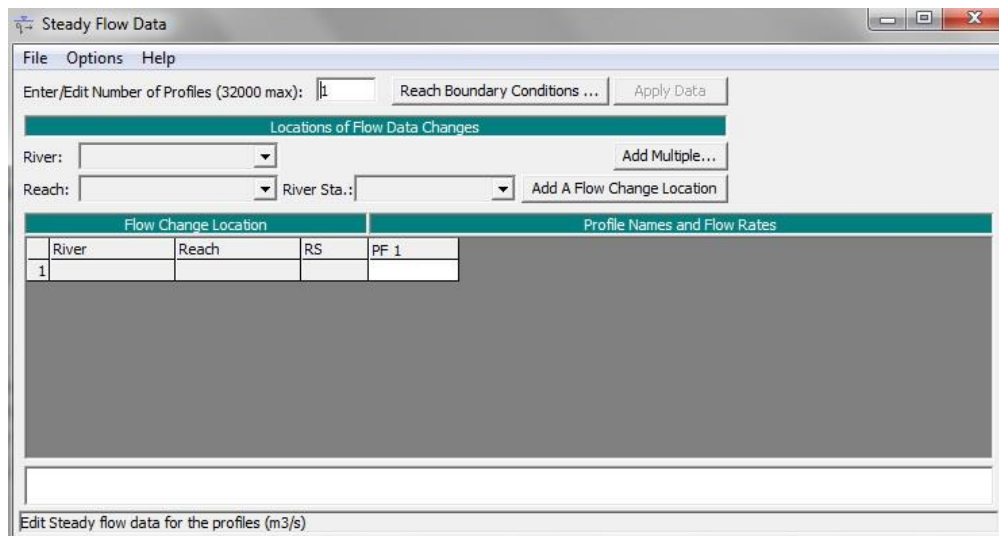


Figura 66 - Editar o escoamento uniforme.

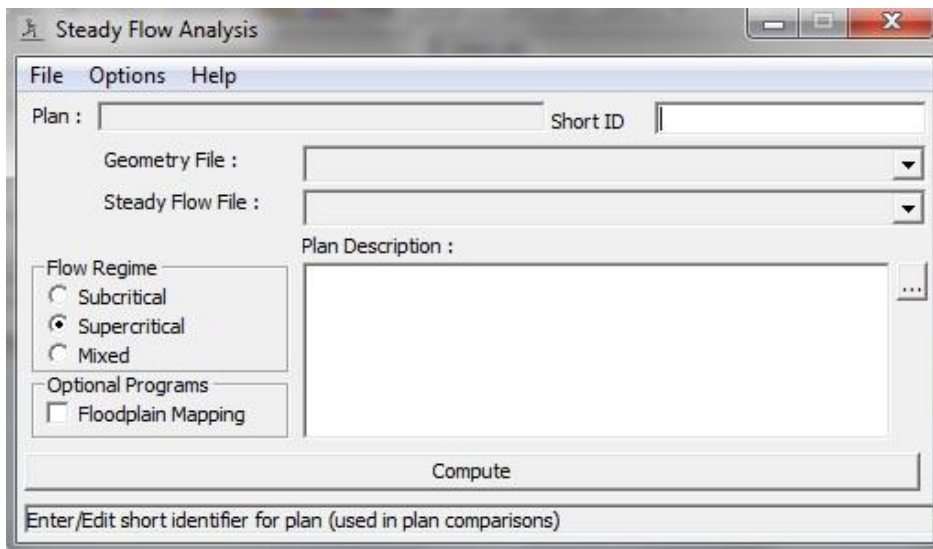


Figura 67 - Simulação do escoamento uniforme.

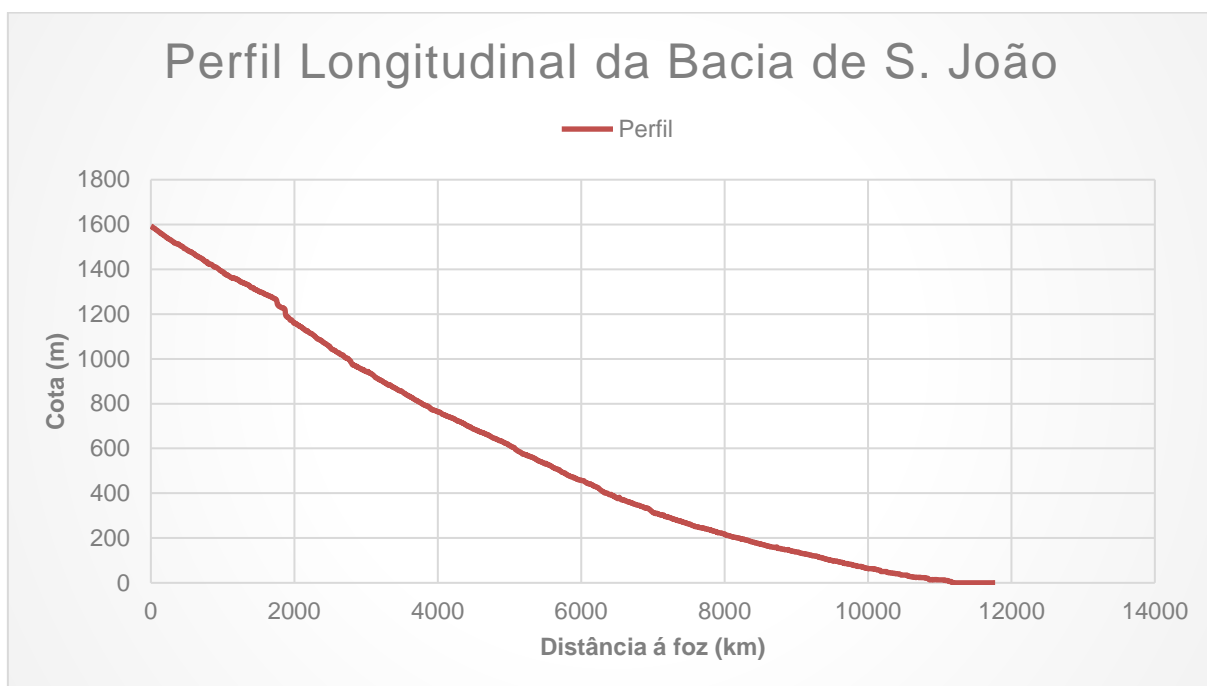


Figura 68 - Perfil longitudinal de São João.

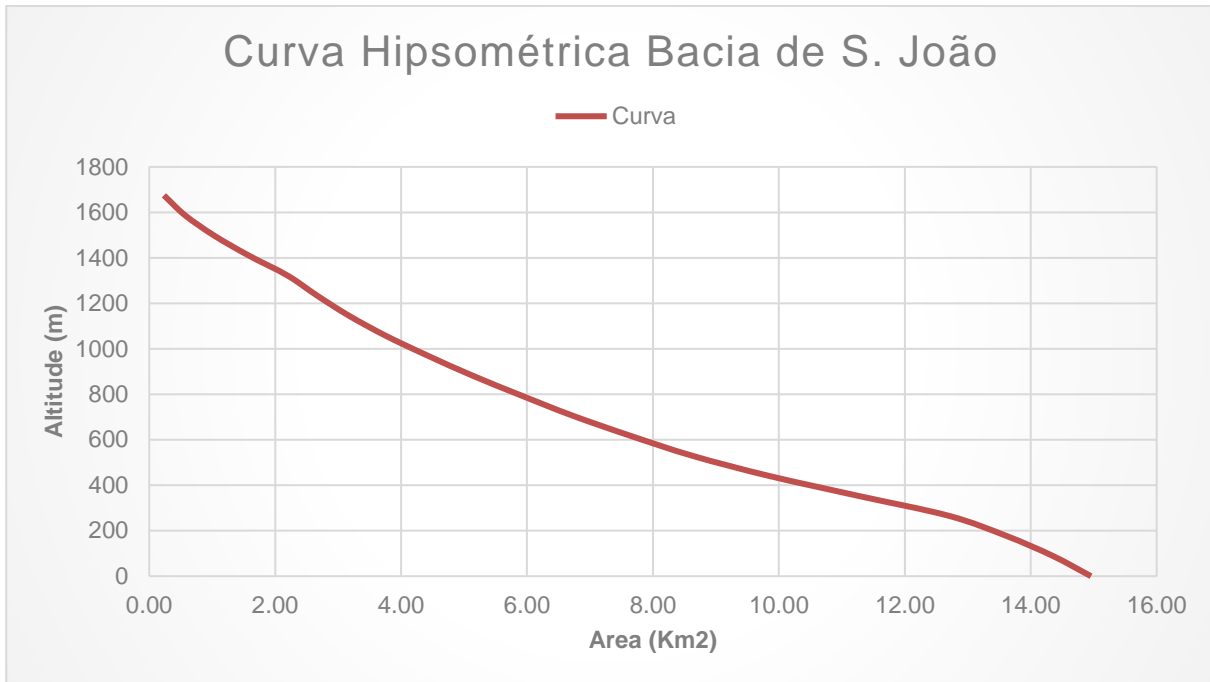


Figura 69 - Curva hipsométrica de São João.

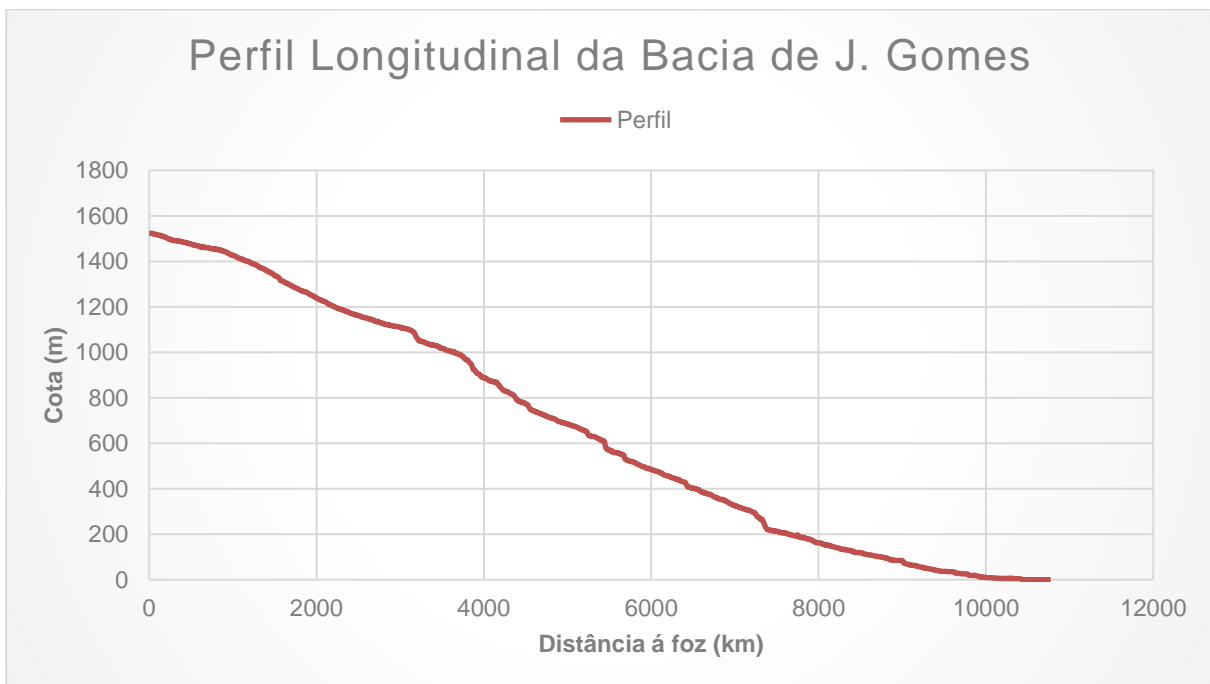


Figura 70 - Perfil longitudinal de João Gomes.

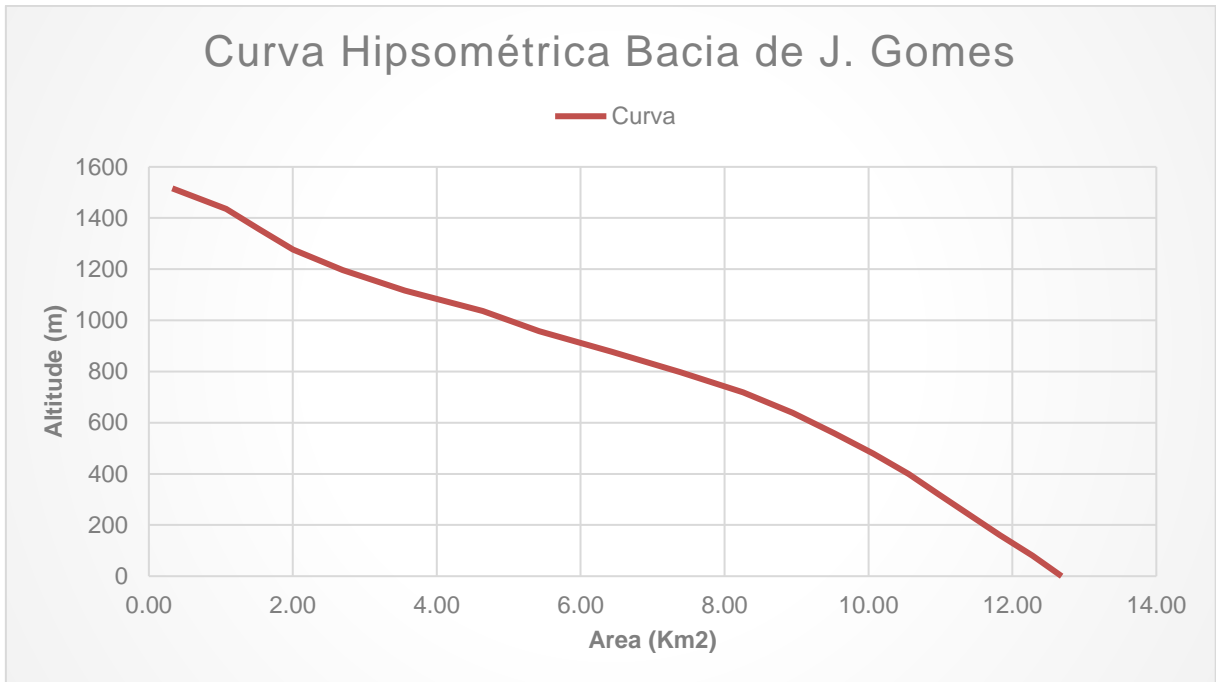


Figura 71 - Curva hipsométrica de João Gomes.

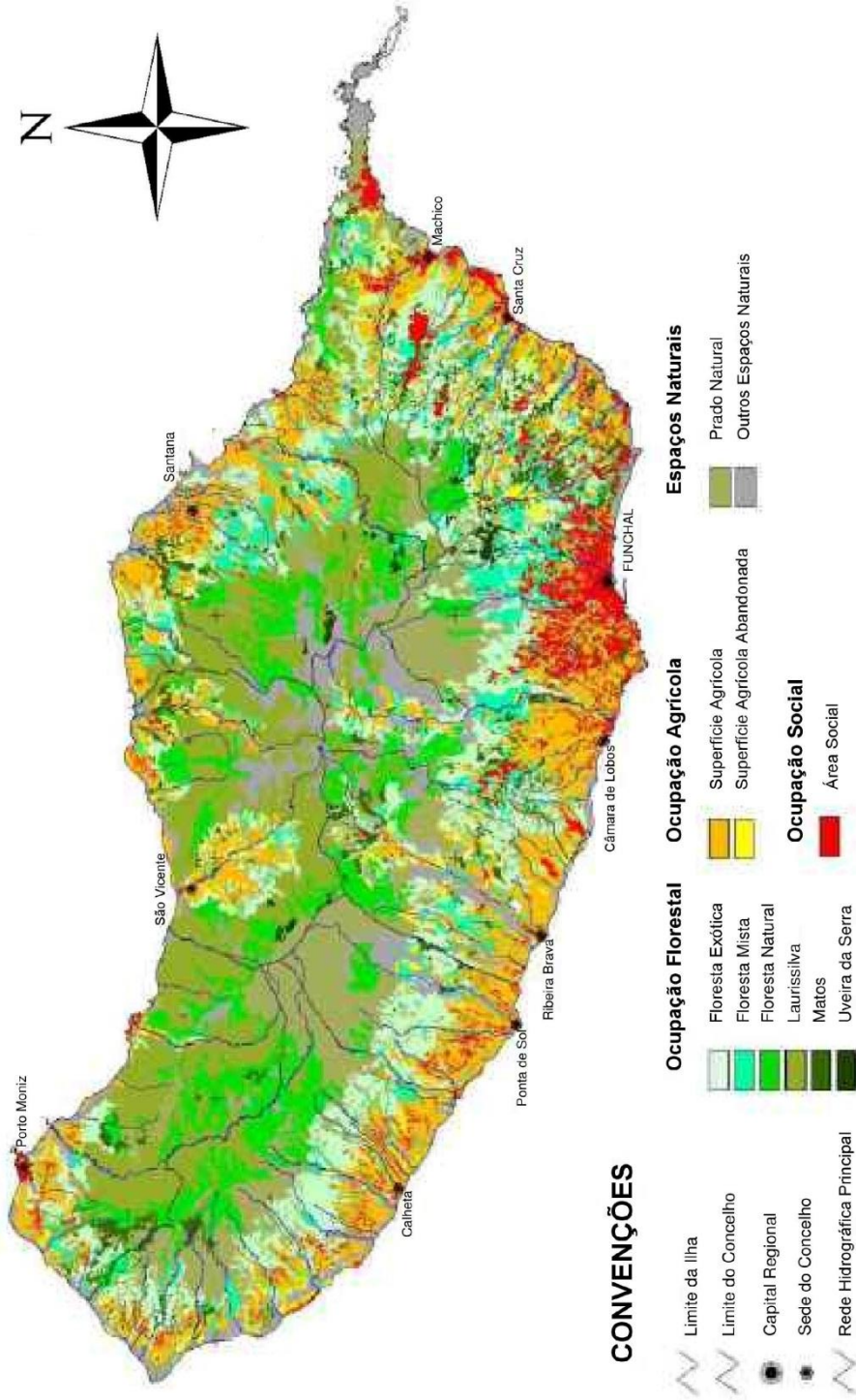


Figura 72 - Carta de ocupação e de usos do solo da ilha da Madeira.



CÂMARA MUNICIPAL DO FUNCHAL
Planta de Ordenamento do PDM - Alteração por Adaptação (12/12/2008)

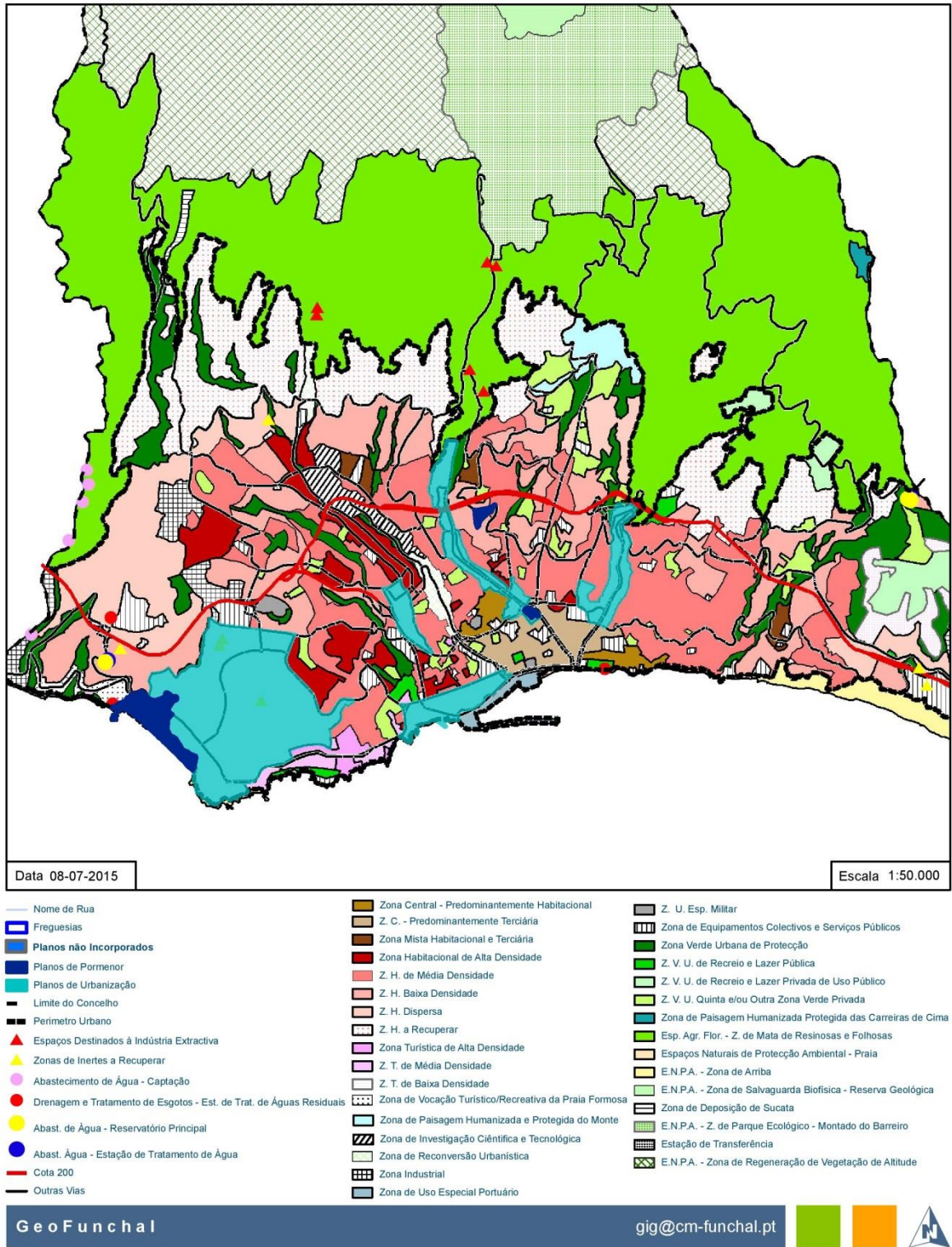


Figura 73 - PDM do Funchal, planta.

ANEXO 2

Tabela 25 - Alturas de água no modelo reduzido para os três casos da ribeira de S. João.

Ensaios					
Número	Secção	x (m)	Altura de água		
			S. João Vegetação	S. João Misto	S. João Rocha
1	0	0	0.0705	0.0735	0.0740
	1	0.41	0.0630	0.0600	0.0610
	2	0.91	0.0615	0.0635	0.0605
	3	1.41	0.0645	0.0645	0.0650
	4	1.91	0.0630	0.0655	0.0630
	5	2.32	0.0570	0.0550	0.0535
2	0	0	0.0700	0.0740	0.0745
	1	0.41	0.0635	0.0600	0.0615
	2	0.91	0.0615	0.0635	0.0605
	3	1.41	0.0645	0.0645	0.0645
	4	1.91	0.0625	0.0660	0.0630
	5	2.32	0.0570	0.0600	0.0535
3	0	0	0.0705	0.0735	0.0740
	1	0.41	0.0630	0.0600	0.0615
	2	0.91	0.0615	0.0635	0.0650
	3	1.41	0.0645	0.0650	0.0650
	4	1.91	0.0635	0.0655	0.0630
	5	2.32	0.0575	0.0550	0.0540
Média	0	0	0.0703	0.0737	0.0742
	1	0.41	0.0632	0.0600	0.0613
	2	0.91	0.0615	0.0635	0.0620
	3	1.41	0.0645	0.0647	0.0648
	4	1.91	0.0630	0.0657	0.0630
	5	2.32	0.0572	0.0567	0.0537

Tabela 26 - Alturas de água no modelo reduzido para os três casos da ribeira de S. Luzia.

Ensaios					
Número	Secção	x (m)	Altura de água		
			S. Luzia Vegetação	S. Luzia Misto	S. Luzia Rocha
1	0	0	0.0745	0.0750	0.0775
	1	0.41	0.0710	0.0690	0.0715
	2	0.91	0.0725	0.0665	0.0760
	3	1.41	0.0715	0.0680	0.0740
	4	1.91	0.0695	0.0675	0.0665
	5	2.32	0.0595	0.0565	0.0545
2	0	0	0.0745	0.0750	0.0775
	1	0.41	0.0715	0.0695	0.0710
	2	0.91	0.0725	0.0665	0.0760
	3	1.41	0.0710	0.0675	0.0735
	4	1.91	0.0700	0.0675	0.0665
	5	2.32	0.0600	0.0560	0.0545
3	0	0	0.0745	0.0750	0.0780
	1	0.41	0.0710	0.0690	0.0715
	2	0.91	0.0725	0.0665	0.0760
	3	1.41	0.0710	0.0680	0.0740
	4	1.91	0.0695	0.0675	0.0670
	5	2.32	0.0600	0.0565	0.0545
Média	0	0	0.0745	0.0750	0.0777
	1	0.41	0.0712	0.0692	0.0713
	2	0.91	0.0725	0.0665	0.0760
	3	1.41	0.0712	0.0678	0.0738
	4	1.91	0.0697	0.0675	0.0667
	5	2.32	0.0598	0.0563	0.0545

Tabela 27 - Alturas de água no modelo reduzido para os três casos da ribeira de J. Gomes.

Ensaio					
Número	Secção	x (m)	Altura de água		
			J. Gomes Vegetação	J. Gomes Misto	J. Gomes Rocha
1	0	0	0.0850	0.0830	0.0875
	1	0.41	0.0815	0.0785	0.0835
	2	0.91	0.0805	0.0790	0.0830
	3	1.41	0.0775	0.0750	0.0790
	4	1.91	0.0735	0.0735	0.0735
	5	2.32	0.0595	0.0585	0.0530
2	0	0	0.0845	0.0825	0.0880
	1	0.41	0.0815	0.0785	0.0835
	2	0.91	0.0810	0.0790	0.0825
	3	1.41	0.0775	0.0750	0.0790
	4	1.91	0.0735	0.0740	0.0735
	5	2.32	0.0595	0.0585	0.0530
3	0	0	0.0850	0.0830	0.0875
	1	0.41	0.0815	0.0785	0.0835
	2	0.91	0.0805	0.0790	0.0830
	3	1.41	0.0775	0.0745	0.0790
	4	1.91	0.0735	0.0735	0.0735
	5	2.32	0.0600	0.0585	0.0535
Média	0	0	0.0848	0.0828	0.0877
	1	0.41	0.0815	0.0785	0.0835
	2	0.91	0.0807	0.0790	0.0828
	3	1.41	0.0775	0.0748	0.0790
	4	1.91	0.0735	0.0737	0.0735
	5	2.32	0.0597	0.0585	0.0532

Tabela 28 - Problemas entre o caso real e modelo reduzido.

Problemas entre o caso real e o modelo reduzido
O material, acrílico, que compõe as paredes do canal multifunções é diferente do material que compõe as paredes das ribeiras, que é o betão, presume-se diferenças ao nível da interação entre a água e as paredes
Defeitos nas paredes e fundo do canal multifunções
Dimensão reduzida do canal multifunções (2,5 m), influencia os casos de estudo
Diferença entre a ordem de grandeza do caudal real para o caudal do canal que é de milhões para dezenas, forçando uma diminuição de escala significativa
O caudal máximo do canal é 10 m ³ /h, mas após a utilização o máximo suportável pelo aparelho é 9,5 m ³ /h
Equívocos de medição do observador na realização da medição e relacionado ao próprio equipamento
O piso onde se encontra o canal não está nivelado
A aplicação da relva artificial e do enrocamento natural dentro do canal multifunções não foi devidamente acoplada ao mesmo, permitindo assim que a água passe por baixo dos mesmos, originando erros de medição

Tabela 29 - Resultados para a secção da ribeira de São João - Vegetação.

Trecho de 23.2 m da ribeira de São João - Vegetação									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.603	313.801	6.818	0.03	0.028	1.015	16177729.050
Jusante	23.2	10	2.914	313.801	10.769	0.03	0.026	2.015	19629646.480
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.63	313.801	6.778	0.03	0.035	1.006	16131571.101
Jusante	23.2	10	2.89	313.801	10.858	0.03	0.035	2.040	19689103.891
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0703	9.5	0.436	0.03	0.035	0.525	11526.888
Jusante	2.32	0.086	0.0572	9.5	0.537	0.03	0.027	0.717	13042.070
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.093	313.801	7.802	0.03	0.045	1.232	17384067.579
Jusante	23.2	10	3.327	313.801	9.598	0.03	0.033	1.681	18983695.862

Tabela 30 - Resultados para a secção da ribeira de São João - Rochas.

Trecho de 23.2 m da ribeira de São João - Rochas									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.603	313.801	6.818	0.03	0.034	1.015	16177729.050
Jusante	23.2	10	2.997	313.801	10.472	0.03	0.031	1.932	19426715.794
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.64	313.801	6.763	0.03	0.040	1.003	16114837.106
Jusante	23.2	10	2.92	313.801	10.747	0.03	0.040	2.009	19614523.952
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0742	9.5	0.414	0.03	0.038	0.485	11149.764
Jusante	2.32	0.086	0.0537	9.5	0.572	0.03	0.025	0.788	13514.282
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.338	313.801	7.270	0.03	0.052	1.115	16717732.698
Jusante	23.2	10	3.139	313.801	10.046	0.03	0.033	1.811	19180508.727

Tabela 31 - Resultados para a secção da ribeira de S. Luzia - Vegetação.

Trecho de 23.2 m da ribeira de S. Luzia - Vegetação									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.570	310.445	6.794	0.02	0.033	1.015	16059693.056
Jusante	23.2	10	3.190	310.445	9.731	0.02	0.030	1.740	18764564.743
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.61	310.445	6.734	0.02	0.035	1.002	15992262.598
Jusante	23.2	10	3.12	310.445	9.950	0.02	0.035	1.799	18926803.395
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0745	9.4	0.408	0.02	0.031	0.477	11001.100
Jusante	2.32	0.086	0.0598	9.4	0.507	0.02	0.024	0.663	12570.139
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.247	310.445	7.305	0.02	0.038	1.132	16609024.426
Jusante	23.2	10	3.411	310.445	9.095	0.02	0.028	1.573	18260161.112

Tabela 32 - Resultados para a secção da ribeira de S. Luzia - Rochas.

Trecho de 23.2 m da ribeira de S. Luzia - Rochas									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.570	310.445	6.794	0.02	0.038	1.015	16059693.056
Jusante	23.2	10	3.290	310.445	9.437	0.02	0.035	1.662	18539089.461
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.610	310.445	6.734	0.02	0.040	1.002	15992262.598
Jusante	23.2	10	3.26	310.445	9.523	0.02	0.040	1.685	18606010.117
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0777	9.4	0.391	0.02	0.033	0.448	10712.397
Jusante	2.32	0.086	0.0545	9.4	0.557	0.02	0.021	0.762	13257.736
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.628	310.445	6.708	0.02	0.054	0.996	15961500.649
Jusante	23.2	10	3.247	310.445	9.559	0.02	0.033	1.694	18633055.673

Tabela 33 - Resultados para a secção da ribeira de S. Luzia - Misto.

Trecho de 23.2 m da ribeira de S. Luzia - Misto									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.570	310.445	6.794	0.02	0.035	1.015	16059693.056
Jusante	23.2	10	3.228	310.445	9.616	0.02	0.032	1.710	18677772.309
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.600	310.445	6.749	0.02	0.037	1.005	16008921.205
Jusante	23.2	10	3.22	310.445	9.641	0.02	0.037	1.716	18696550.312
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0750	9.4	0.405	0.02	0.032	0.472	10954.485
Jusante	2.32	0.086	0.0563	9.4	0.539	0.02	0.022	0.725	13013.046
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.443	310.445	7.008	0.02	0.048	1.062	16325069.071
Jusante	23.2	10	3.338	310.445	9.331	0.02	0.033	1.631	18490508.861

Tabela 34 - Resultados para a secção da ribeira de J. Gomes - Vegetação.

Trecho de 23.2 m da ribeira de J. Gomes - Vegetação									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.275	280.877	6.571	0.01	0.035	1.015	14992212.005
Jusante	23.2	10	3.443	280.877	8.158	0.01	0.032	1.404	16469009.952
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.310	280.877	6.517	0.01	0.035	1.003	14935340.473
Jusante	23.2	10	3.45	280.877	8.141	0.01	0.035	1.400	16455386.959
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0848	8.5	0.324	0.01	0.029	0.355	9143.678
Jusante	2.32	0.086	0.0597	8.5	0.460	0.01	0.019	0.602	11385.067
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.608	280.877	6.154	0.01	0.045	0.916	14611071.511
Jusante	23.2	10	3.241	280.877	8.750	0.01	0.028	1.553	17034613.254

Tabela 35 - Resultados para a secção da ribeira de J. Gomes - Rochas.

Trecho de 23.2 m da ribeira de J. Gomes - Rochas									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.275	280.877	6.571	0.01	0.040	1.015	14992212.005
Jusante	23.2	10	3.588	280.877	7.828	0.01	0.038	1.320	16190721.259
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.310	280.877	6.517	0.01	0.040	1.003	14935340.473
Jusante	23.2	10	3.57	280.877	7.868	0.01	0.040	1.330	16224973.139
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0877	8.5	0.027	0.01	0.030	0.338	8945.410
Jusante	2.32	0.086	0.0532	8.5	0.027	0.01	0.016	0.715	12154.595
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	5.098	280.877	5.659	0.01	0.056	0.801	14143863.378
Jusante	23.2	10	3.092	280.877	9.331	0.01	0.028	1.695	17650778.229

Tabela 36 - Resultados para a secção da ribeira de J. Gomes - Misto.

Trecho de 23.2 m da ribeira de J. Gomes - Misto									
Folha de cálculo programada									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.275	280.877	6.571	0.01	0.039	1.015	14992212.005
Jusante	23.2	10	3.557	280.877	7.897	0.01	0.036	1.338	16250224.842
HEC-RAS									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.300	280.877	6.532	0.01	0.039	1.006	14951399.979
Jusante	23.2	10	3.51	280.877	8.002	0.01	0.039	1.364	16339367.779
Modelo									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	0.086	0.0828	8.5	0.331	0.01	0.028	0.368	9289.008
Jusante	2.32	0.086	0.0585	8.5	0.469	0.01	0.018	0.620	11515.930
Modelo (após transformação)									
Secção	L (m)	b (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	i (m/m)	n (m ^{-1/3} s)	Fr	Re
Montante	0	10	4.635	280.877	6.074	0.01	0.049	0.901	14465076.217
Jusante	23.2	10	3.273	280.877	8.600	0.01	0.030	1.518	16845653.914

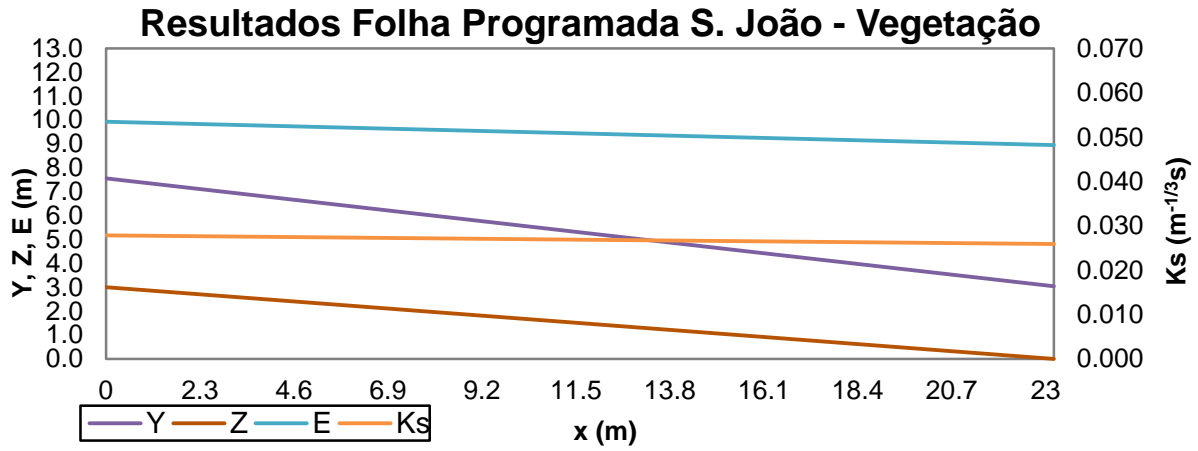


Figura 74 - Folha programada S. João - Vegetação.

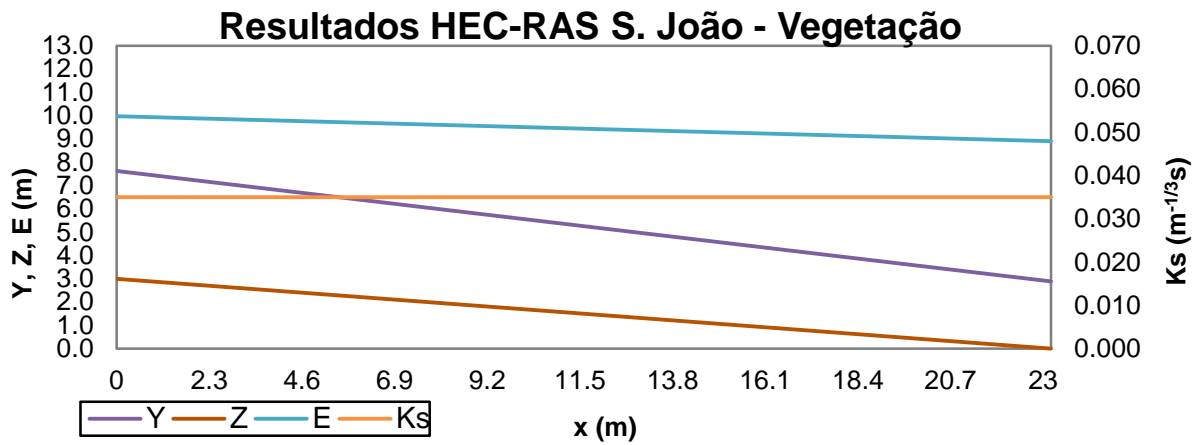


Figura 75 - Programa HEC-RAS S. João - Vegetação.

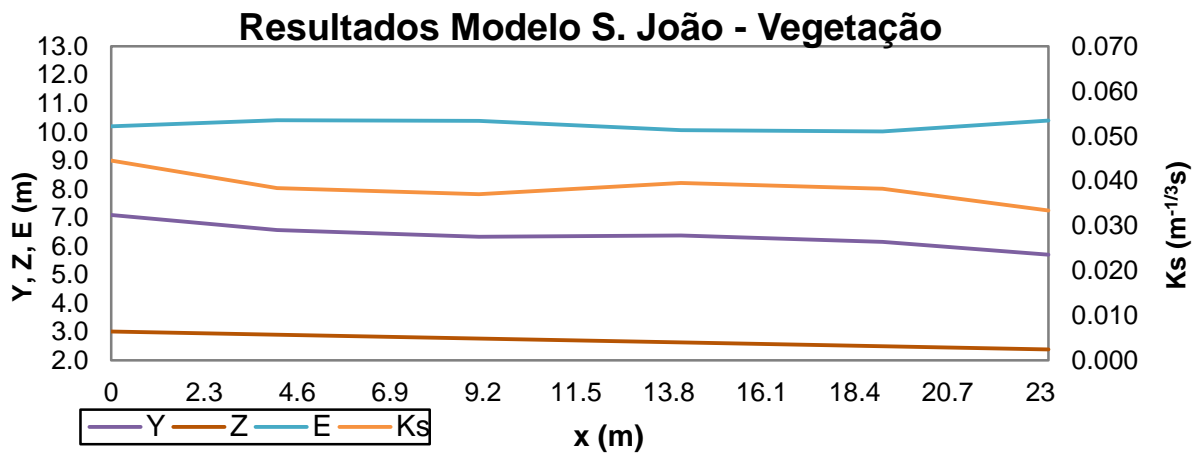


Figura 76 - Modelo transformado S. João - Vegetação.

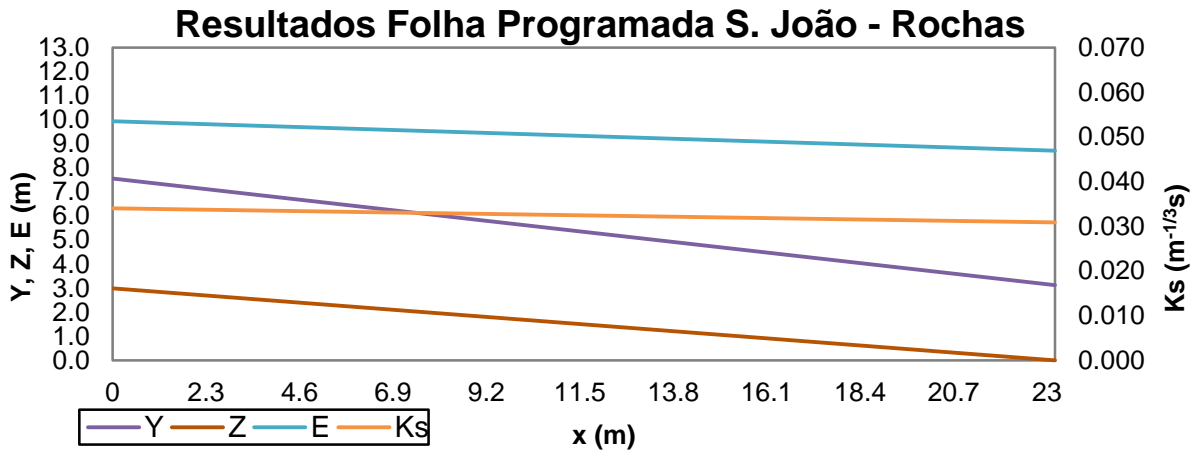


Figura 77 - Folha programada S. João - Rochas.

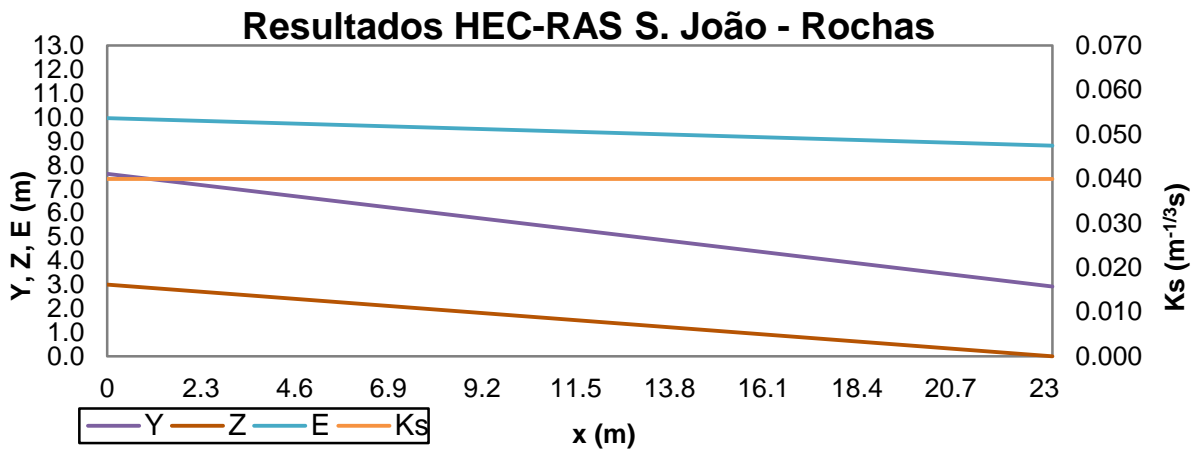


Figura 78 - Programa HEC-RAS S. João - Rochas.

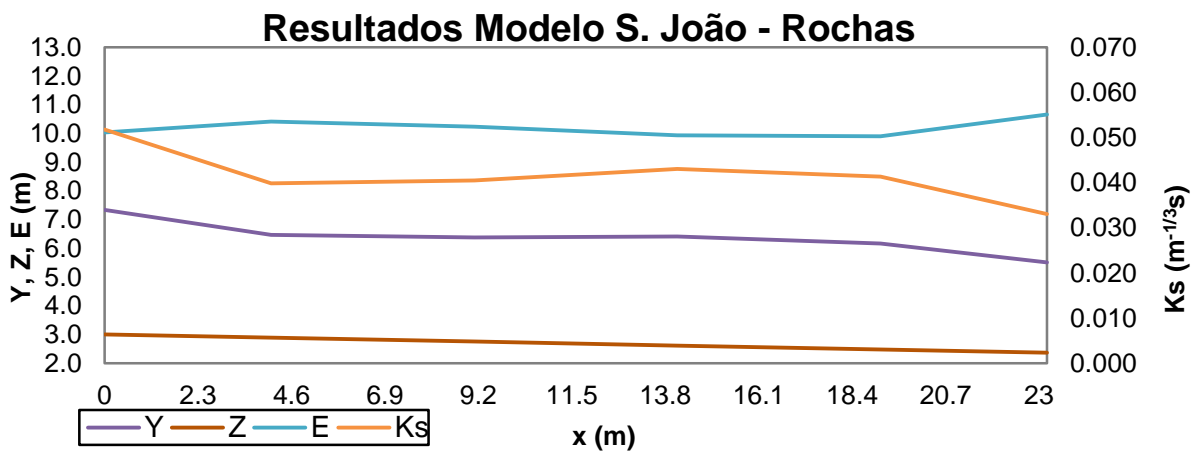


Figura 79 - Modelo transformado S. João - Rochas.

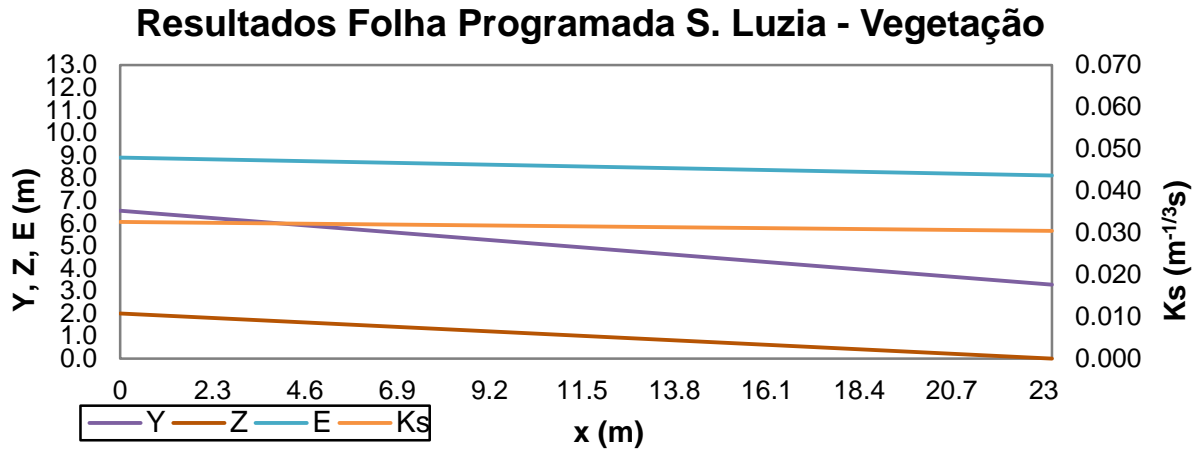


Figura 80 - Folha programada S. Luzia - Vegetação.

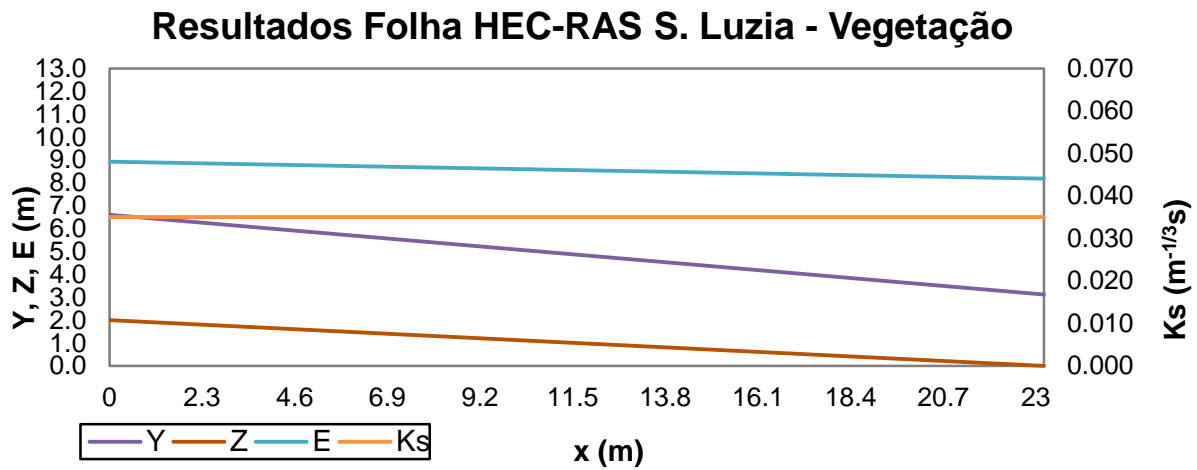


Figura 81 - Programa HEC-RAS S. Luzia - Vegetação.

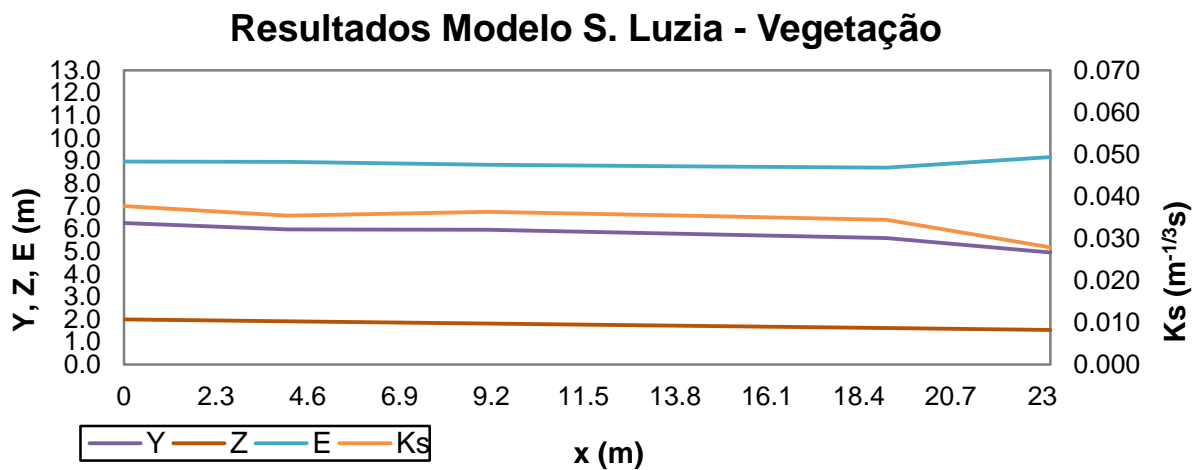


Figura 82 - Modelo transformado S. Luzia - Vegetação.

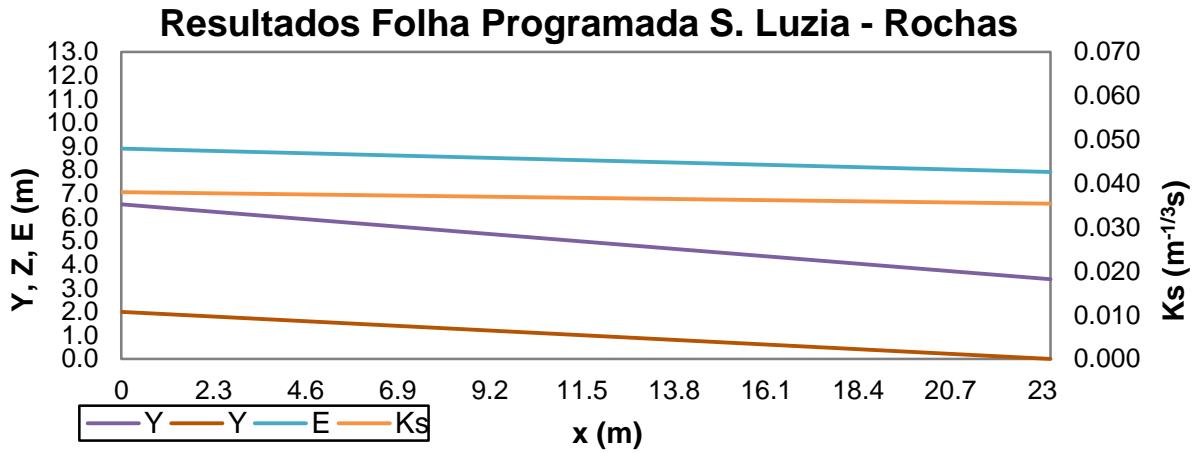


Figura 83 - Folha programada S. Luzia - Rochas.

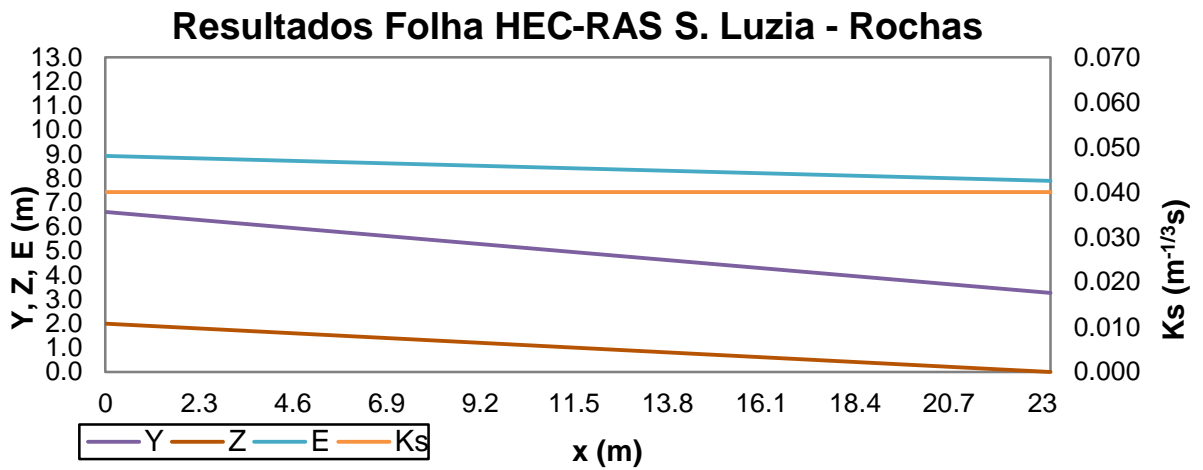


Figura 84 - Programa HEC-RAS S. Luzia - Rochas.

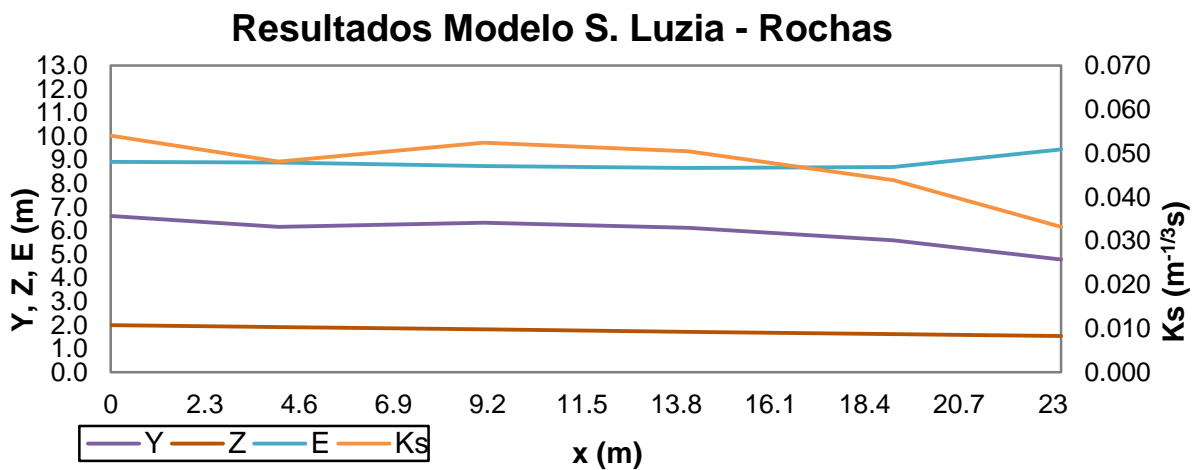


Figura 85 - Modelo transformado S. Luzia - Rochas.

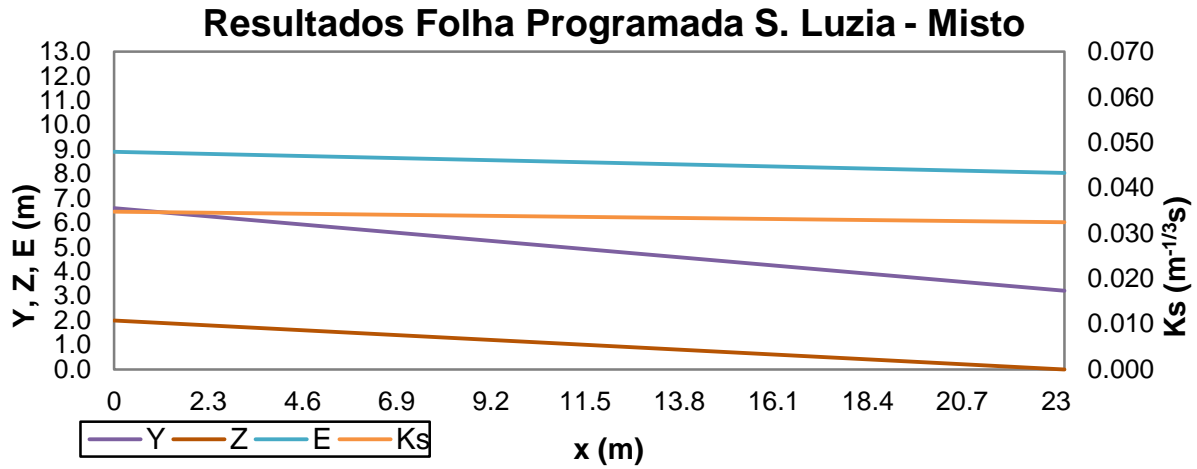


Figura 86 - Folha programada S. Luzia - Misto.

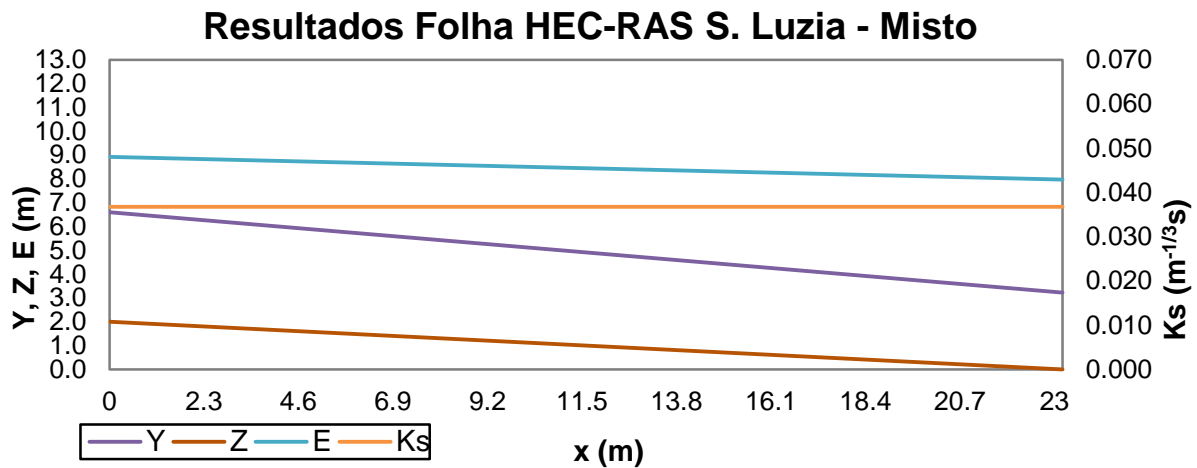


Figura 87 - Programa HEC-RAS S. Luzia - Misto.

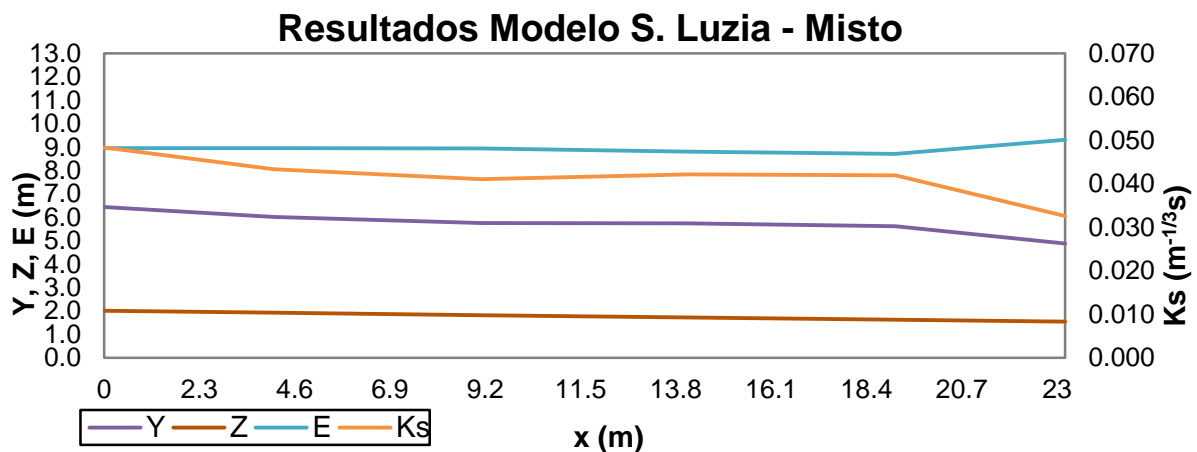


Figura 88 - Modelo transformado S. Luzia - Misto

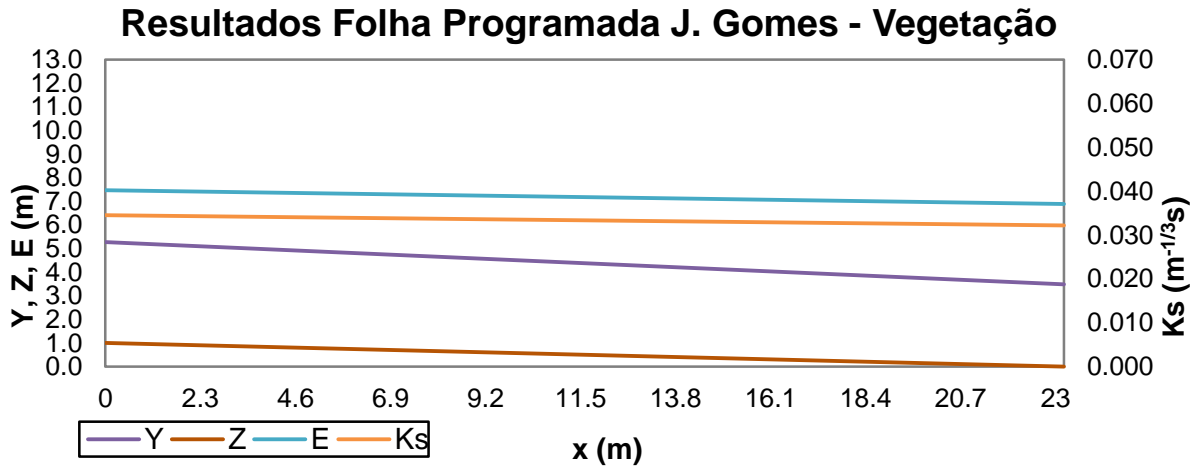


Figura 89 - Folha programada J. Gomes - Vegetação.

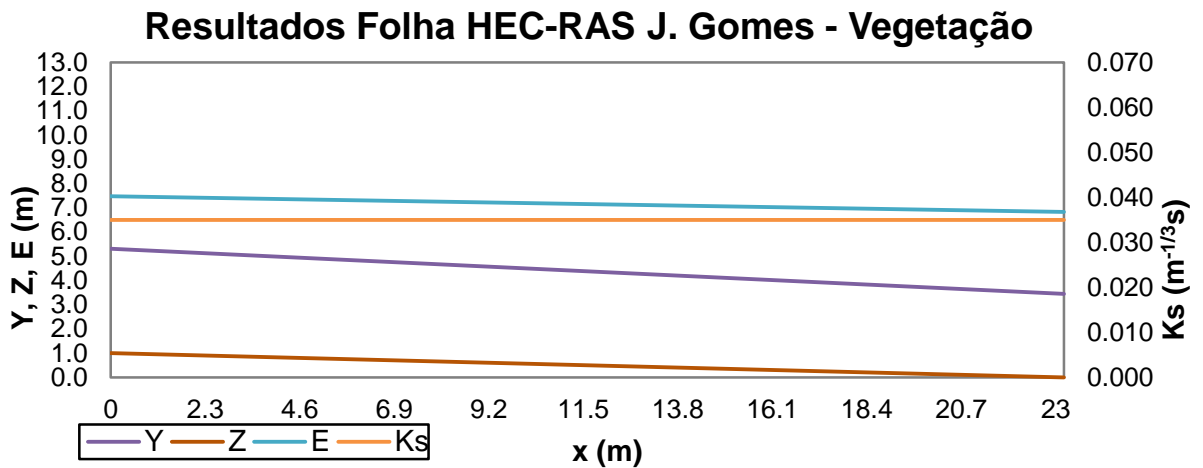


Figura 90 - Programa HEC-RAS J. Gomes - Vegetação.

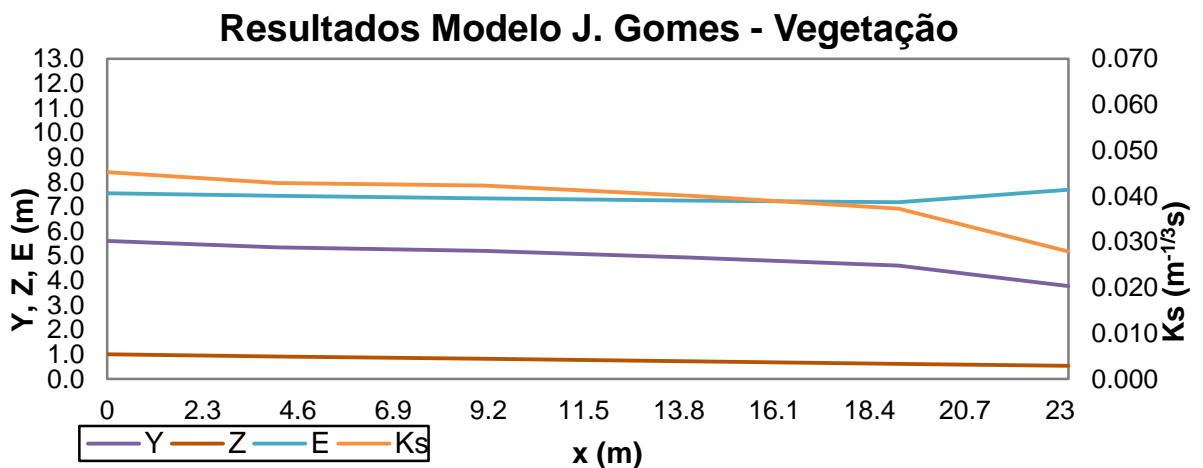


Figura 91 - Modelo transformado J. Gomes - Vegetação.

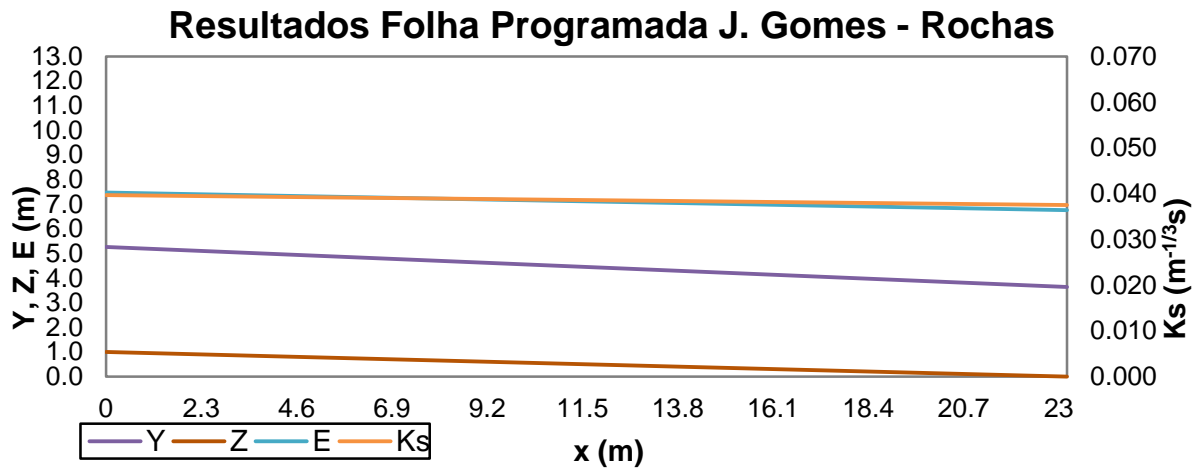


Figura 92 - Folha programada J. Gomes - Rochas.

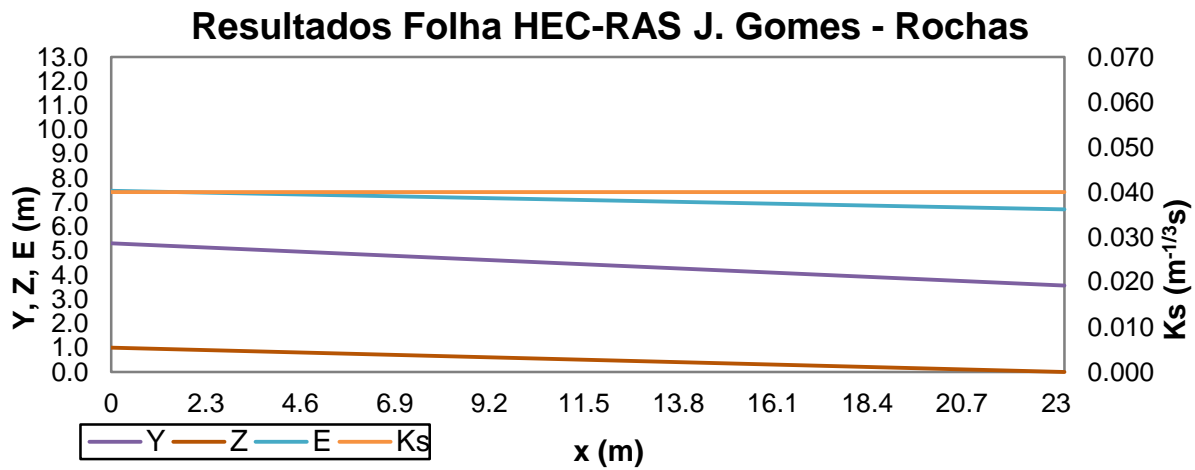


Figura 93 - Programa HEC-RAS J. Gomes - Rochas.

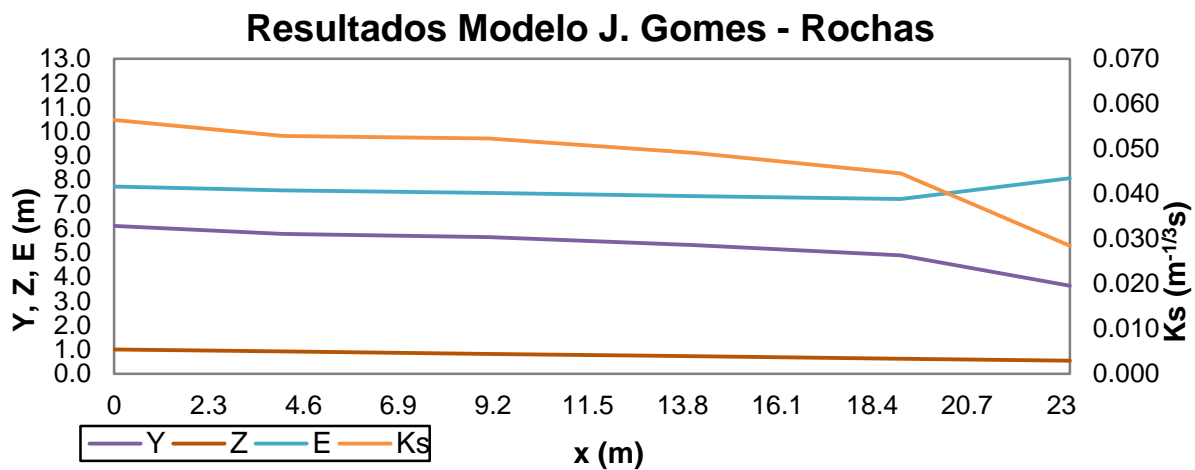


Figura 94 - Modelo transformado J. Gomes - Rochas.

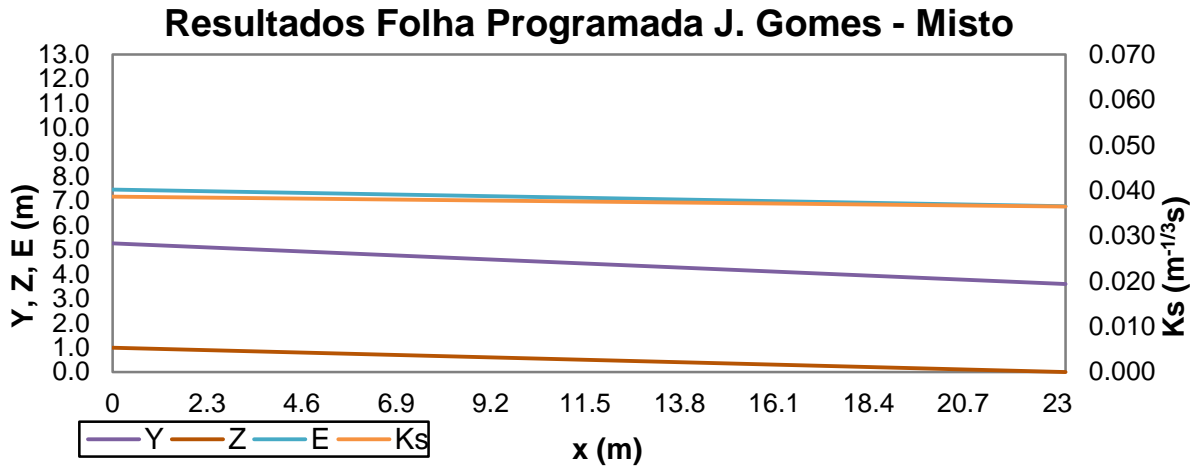


Figura 95 - Folha programada J. Gomes - Misto.

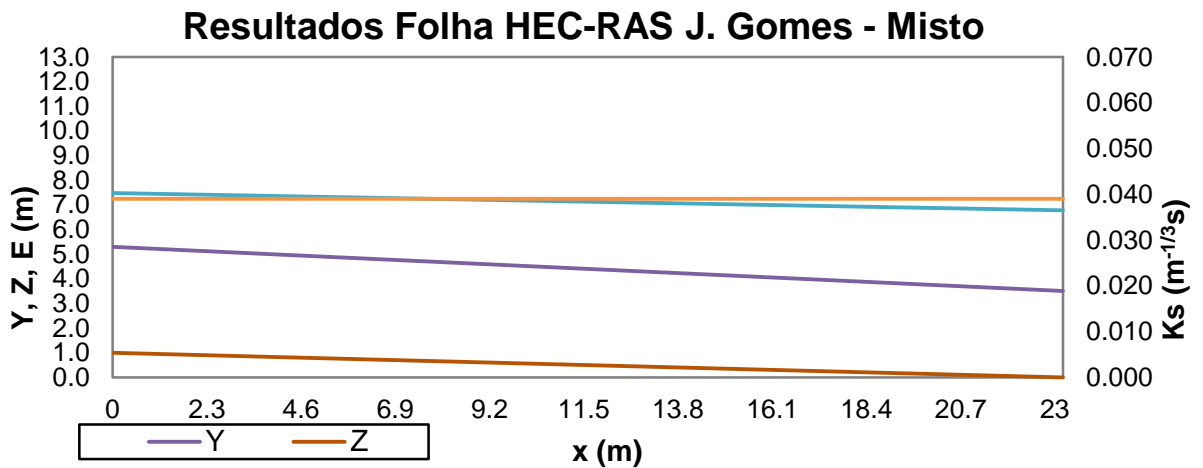


Figura 96 - Programa HEC-RAS J. Gomes - Misto.

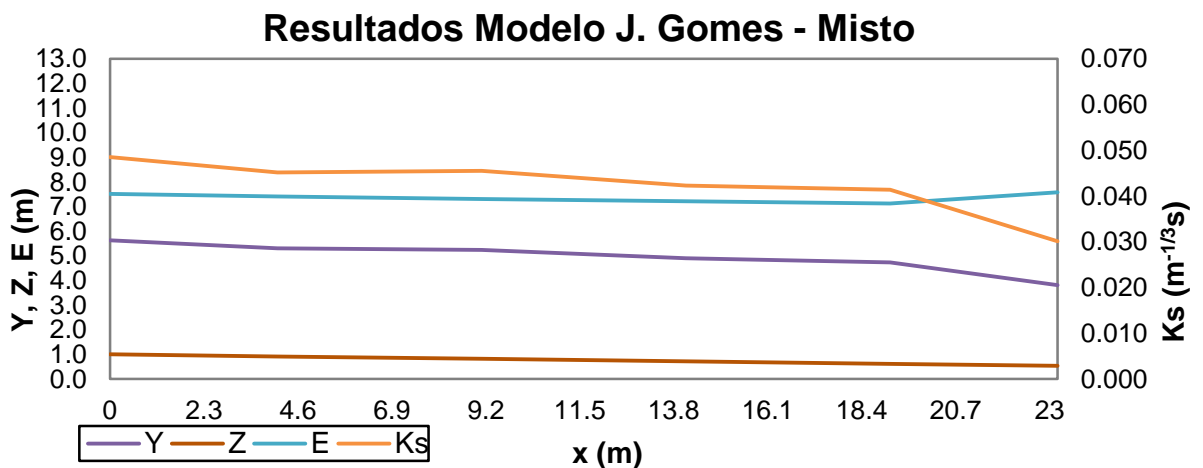


Figura 97 - Modelo transformado J. Gomes - Misto.

ANEXO 3

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada S. João - Vegetação

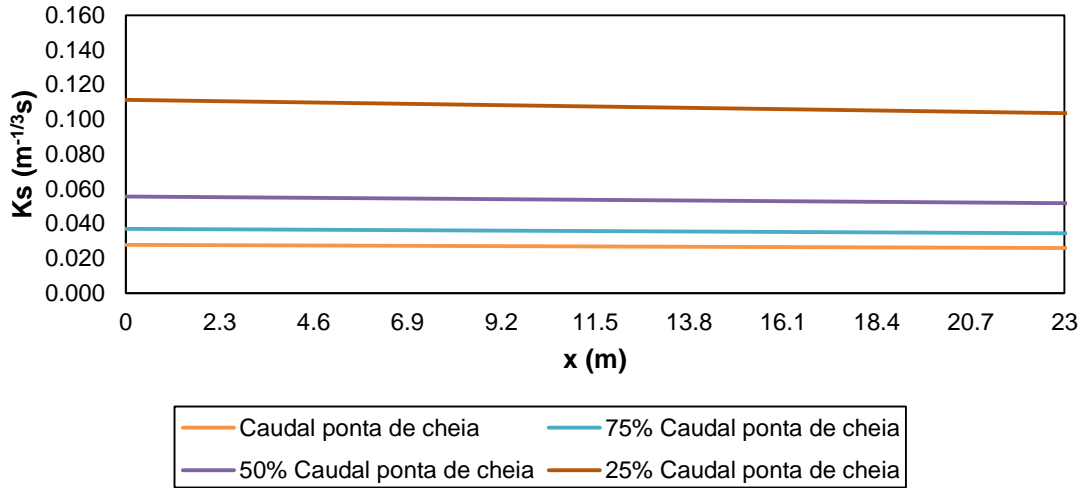


Figura 98 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. João - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Vegetação

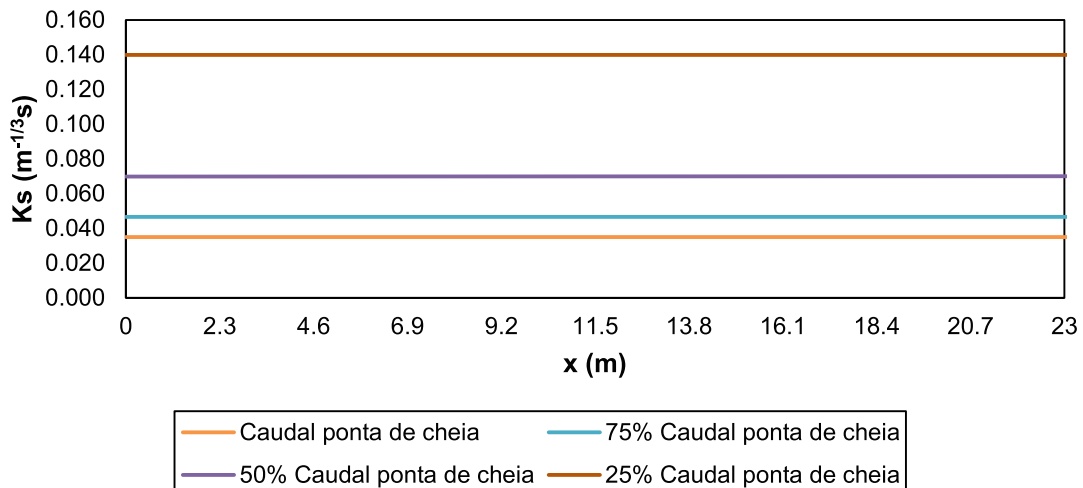


Figura 99 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo S. João - Vegetação

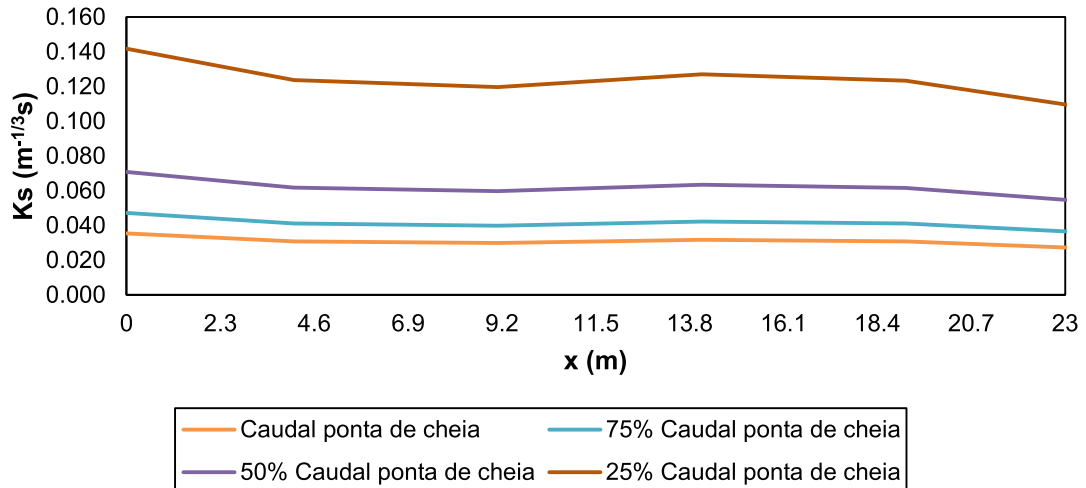


Figura 100 - Coeficiente de rugosidade modelo S. João - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Média S. João - Vegetação

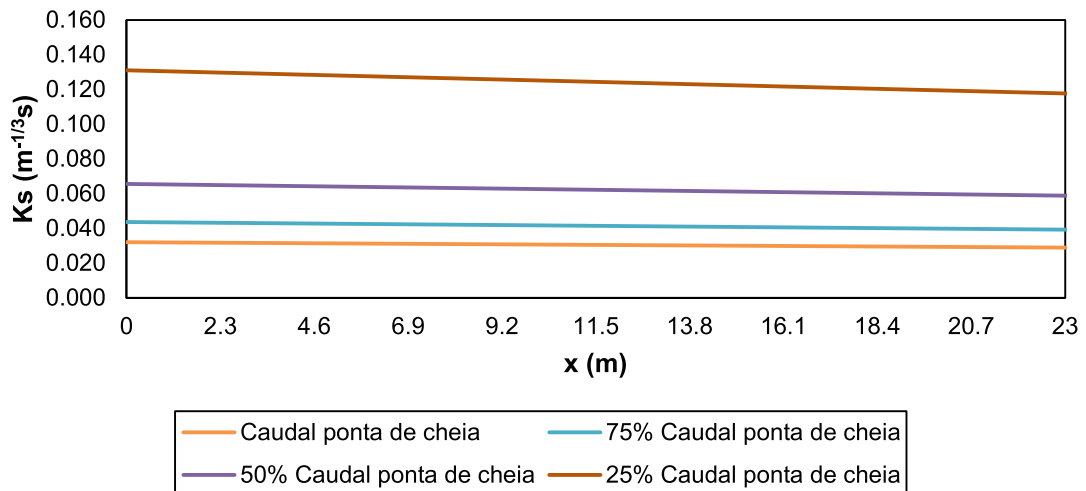


Figura 101 - Coeficiente de rugosidade média S. João - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada S. João - Rochas

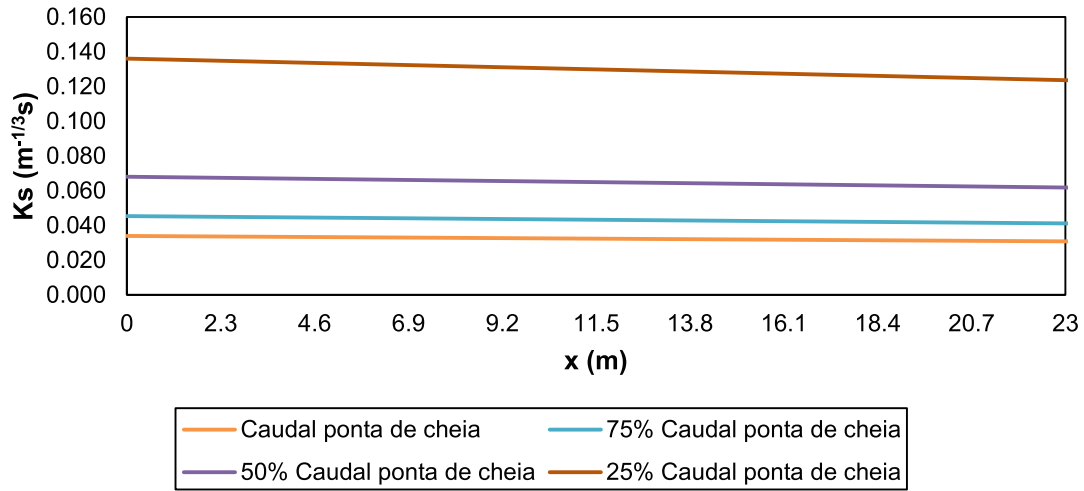


Figura 102 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. João - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Rochas

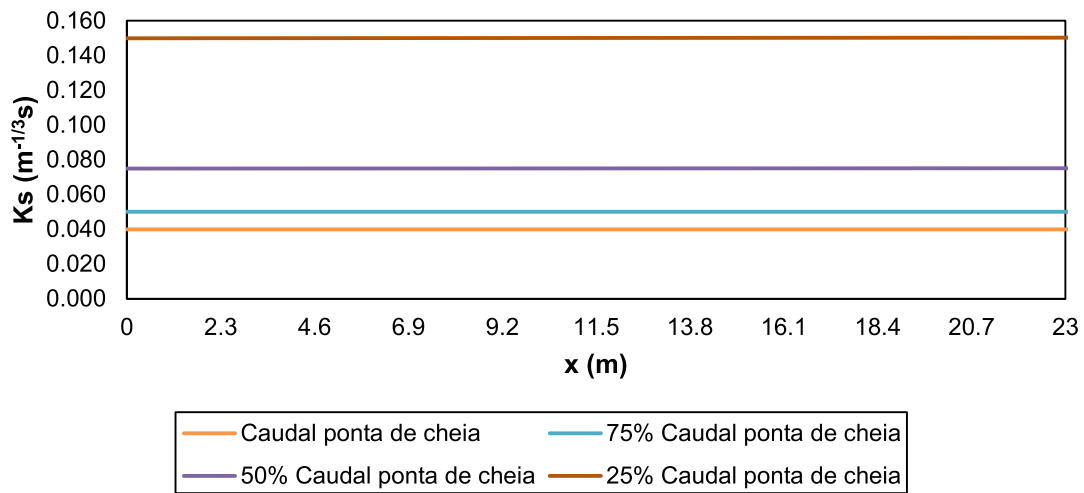


Figura 103 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. João - Rochas.

Varição do coeficiente de rugosidade Modelo S. João - Rochas

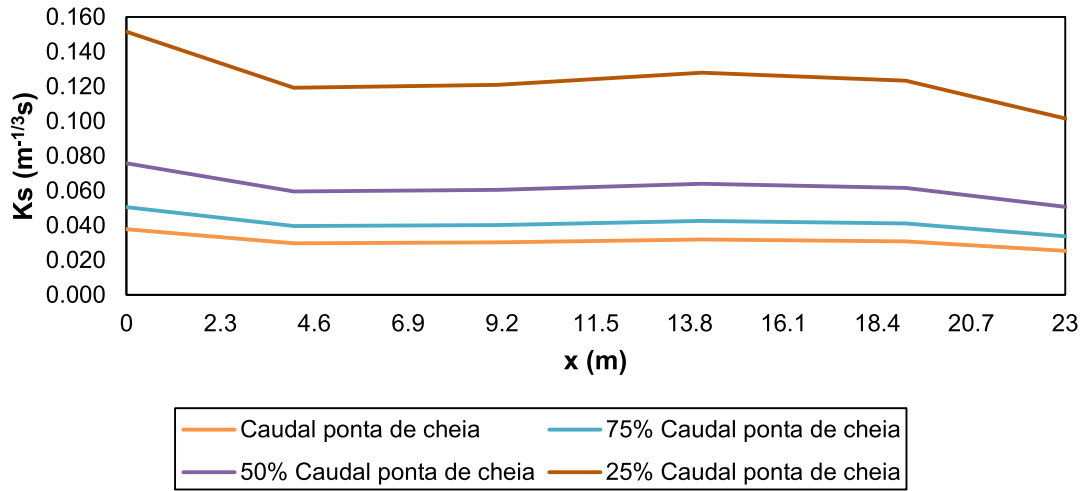


Figura 104 - Coeficiente de rugosidade modelo S. João - Rochas.

Varição do coeficiente de rugosidade Média S. João - Rochas

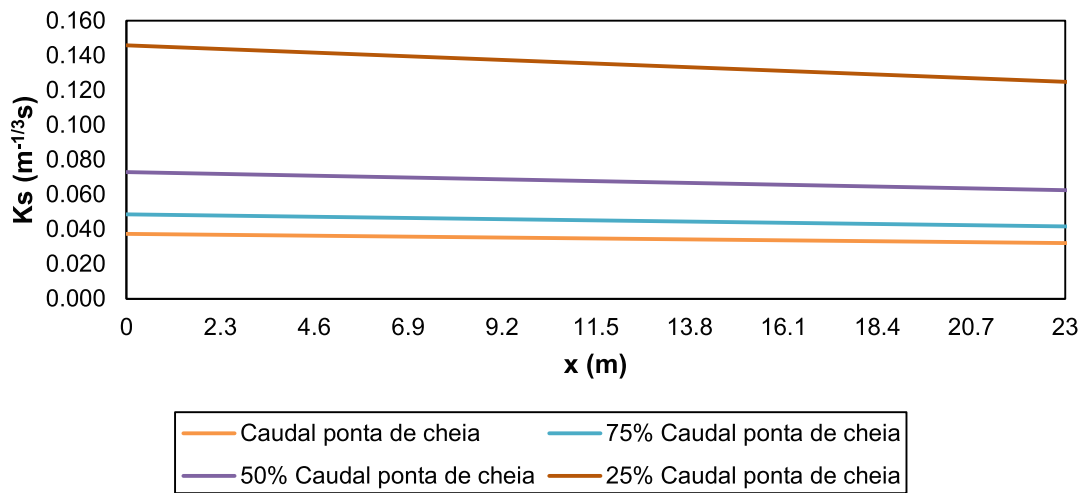


Figura 105 - Coeficiente de rugosidade média S. João - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada S. Luzia - Vegetação

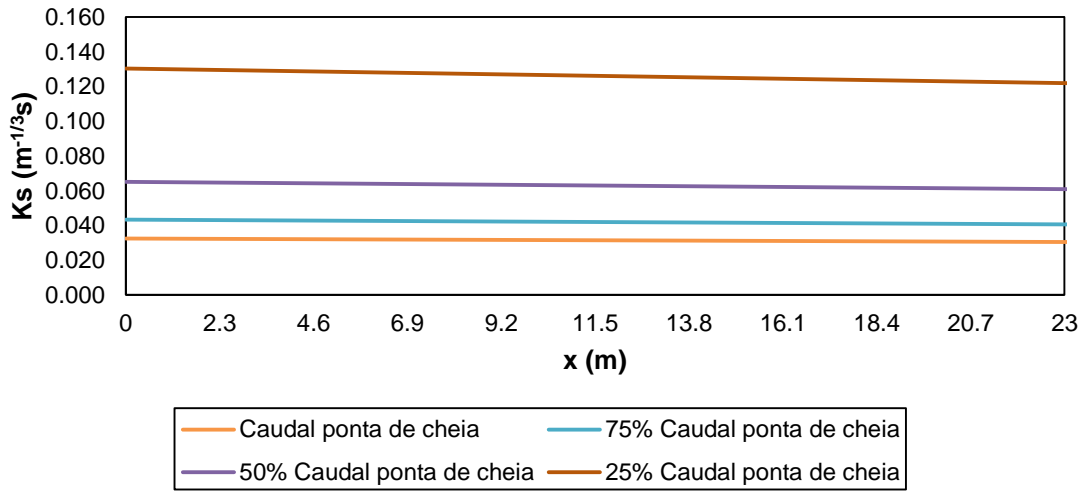


Figura 106 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. Luzia - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Vegetação

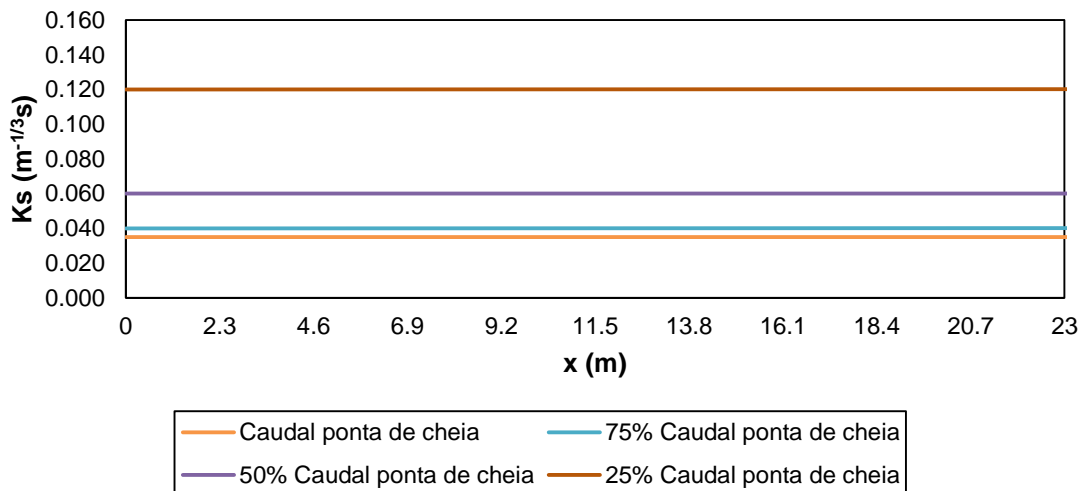


Figura 107 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo S. Luzia - Vegetação

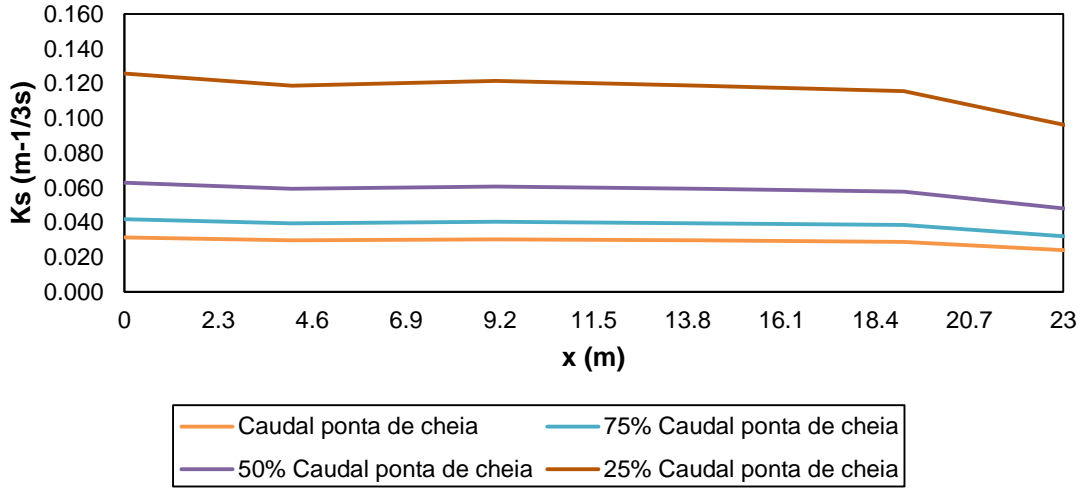


Figura 108 - Coeficiente de rugosidade modelo S. Luzia - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Média S. Luzia - Vegetação

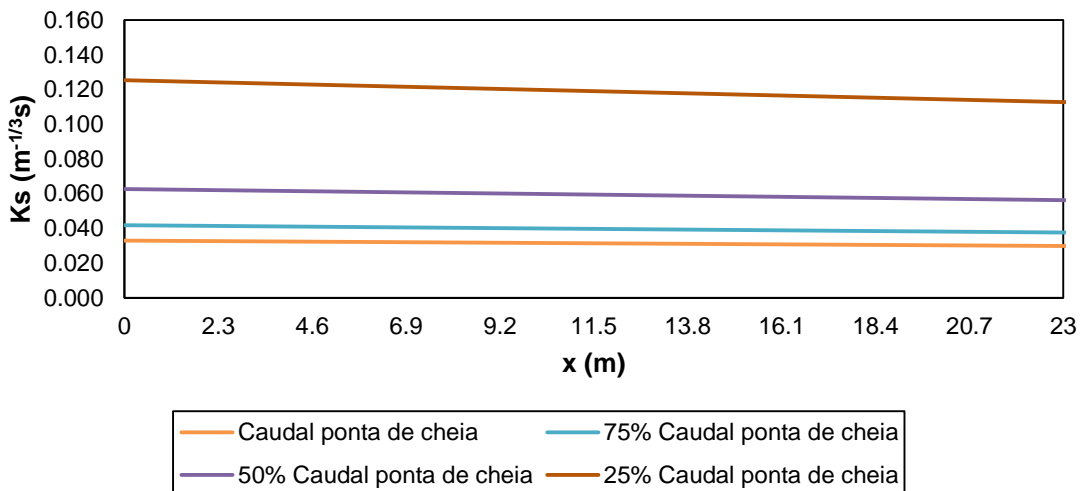


Figura 109 - Coeficiente de rugosidade média S. Luzia - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada S. Luzia - Rochas

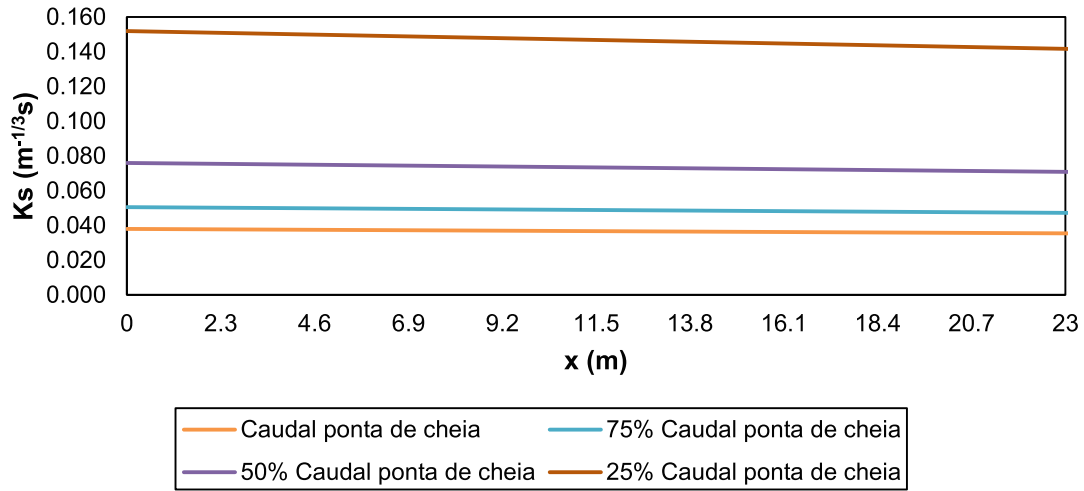


Figura 110 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. Luzia - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Rochas

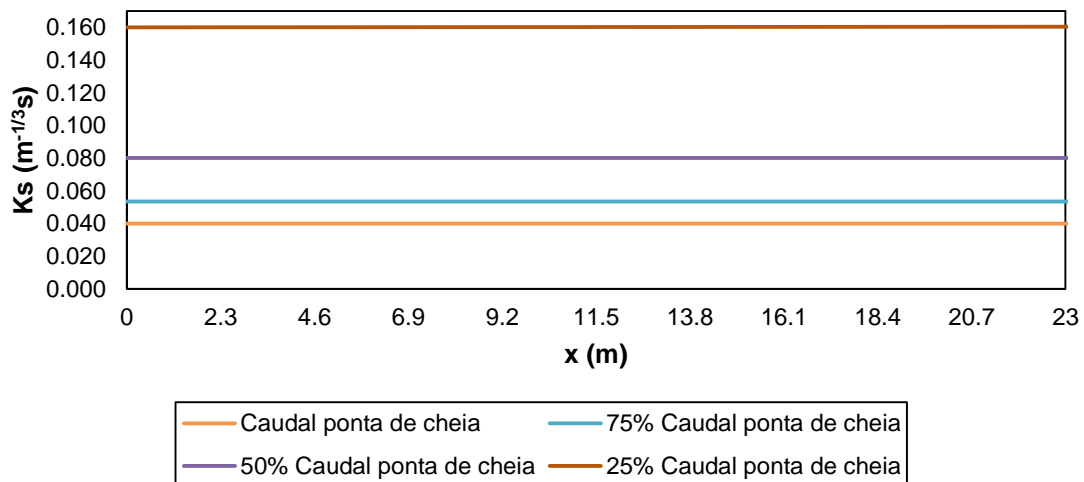


Figura 111 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Rochas.

Varição do coeficiente de rugosidade Modelo S. Luzia - Rochas

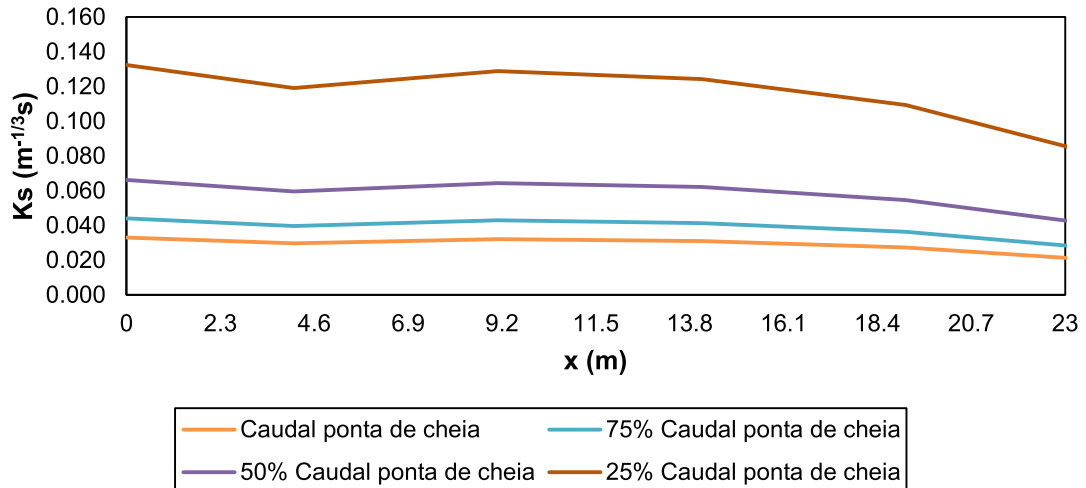


Figura 112 - Coeficiente de rugosidade modelo S. Luzia - Rochas.

Varição do coeficiente de rugosidade Média S. Luzia - Rochas

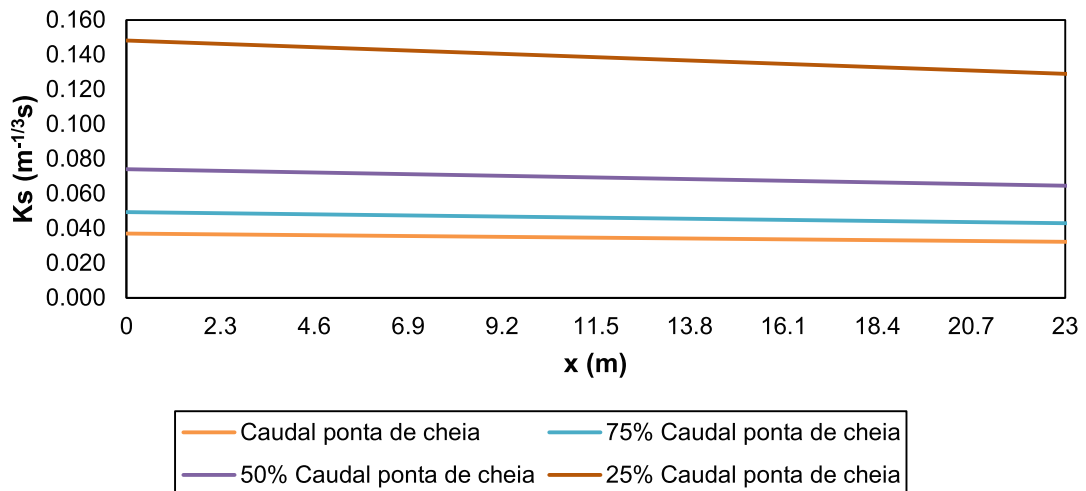


Figura 113 - Coeficiente de rugosidade média S. Luzia - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada S. Luzia - Misto

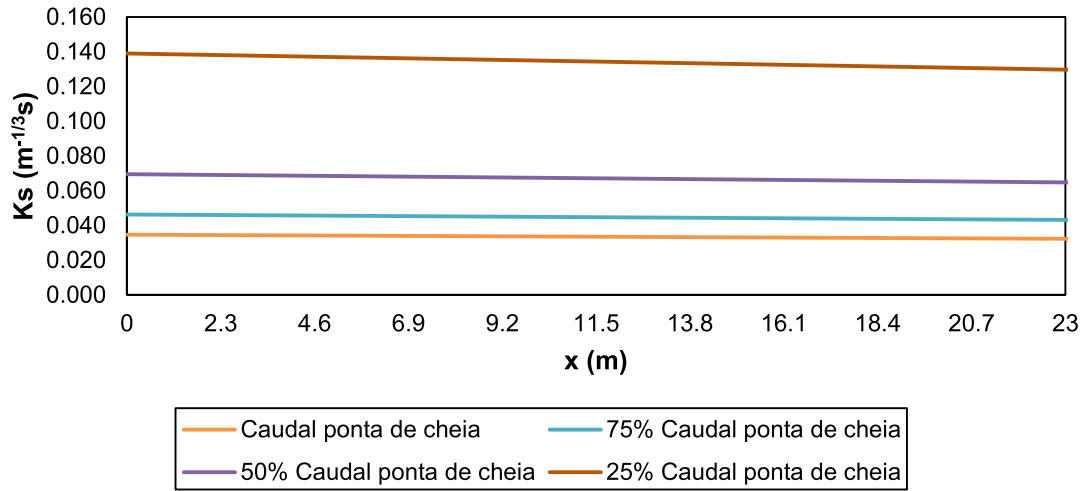


Figura 114 - Coeficiente de rugosidade folha programada S. Luzia - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Misto

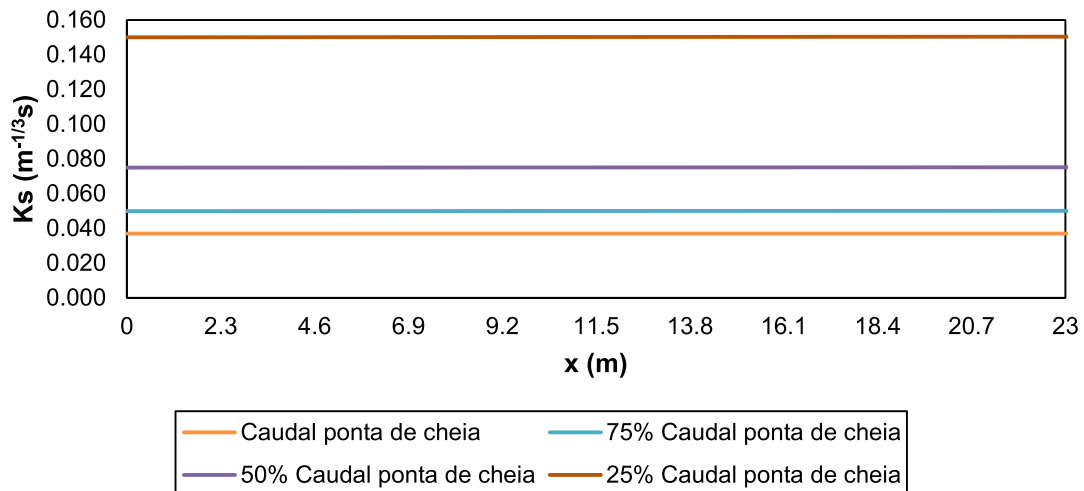


Figura 115 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS S. Luzia - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo S. Luzia - Misto

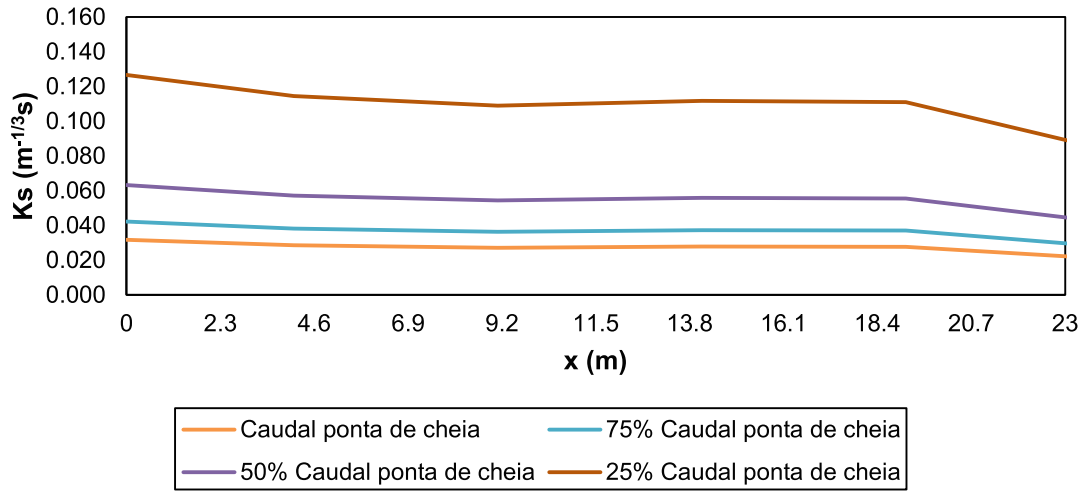


Figura 116 - Coeficiente de rugosidade modelo S. Luzia - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade Média S. Luzia - Misto

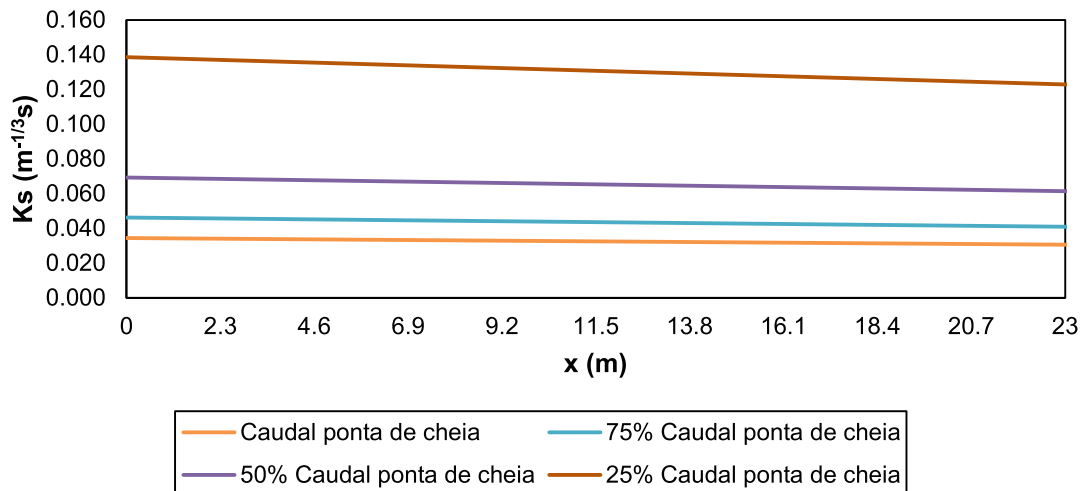


Figura 117 - Coeficiente de rugosidade média S. Luzia - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada J. Gomes - Vegetação

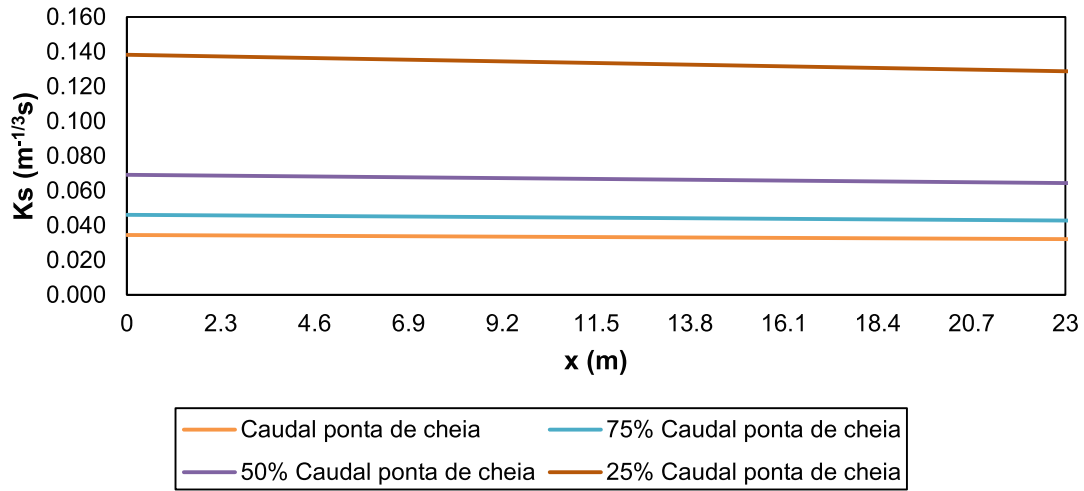


Figura 118 - Coeficiente de rugosidade folha programada J. Gomes - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Vegetação

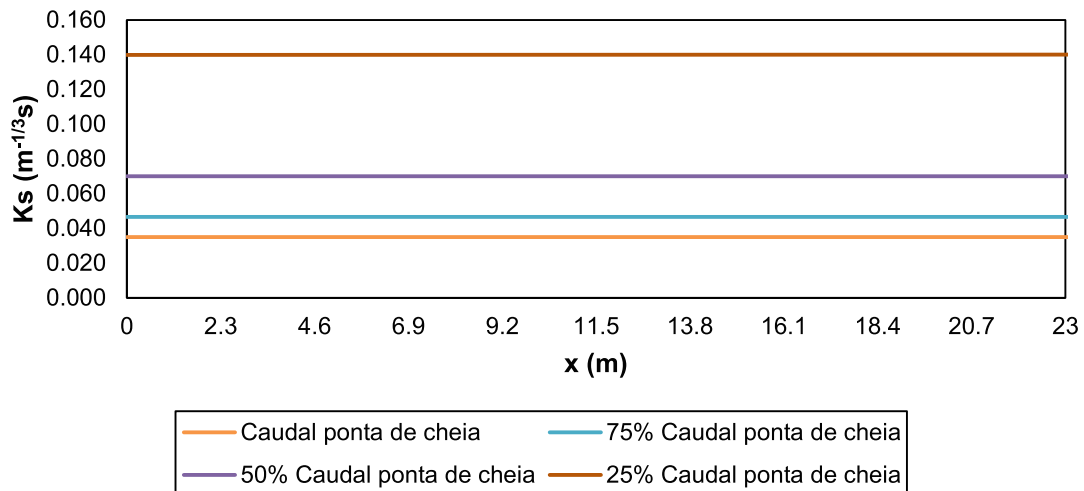


Figura 119 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo J. Gomes - Vegetação

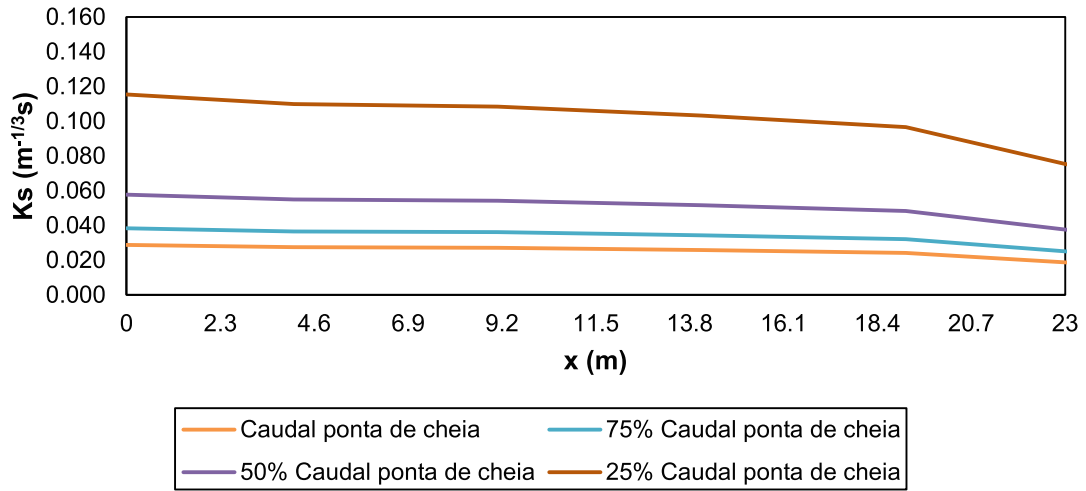


Figura 120 - Coeficiente de rugosidade modelo J. Gomes - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Média J. Gomes - Vegetação

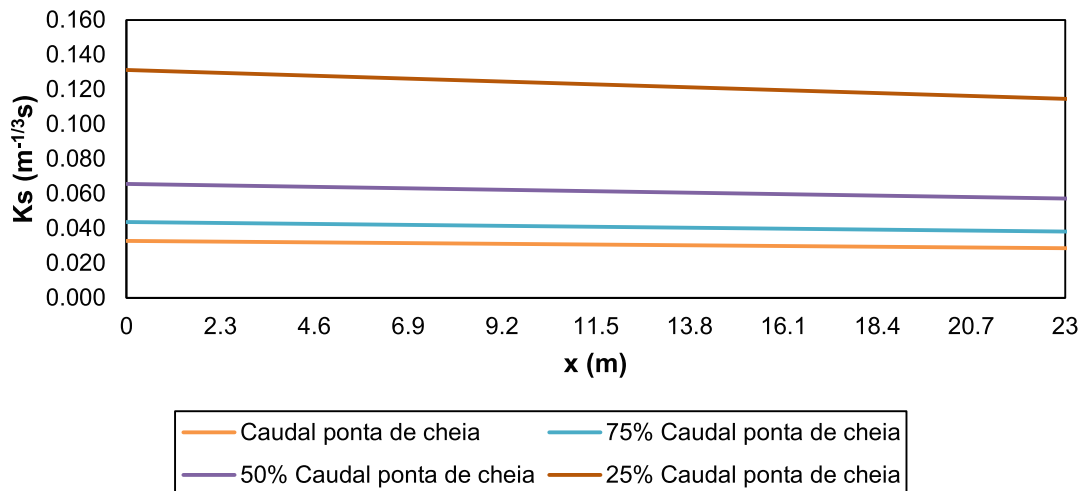


Figura 121 - Coeficiente de rugosidade média J. Gomes - Vegetação.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada J. Gomes - Rochas

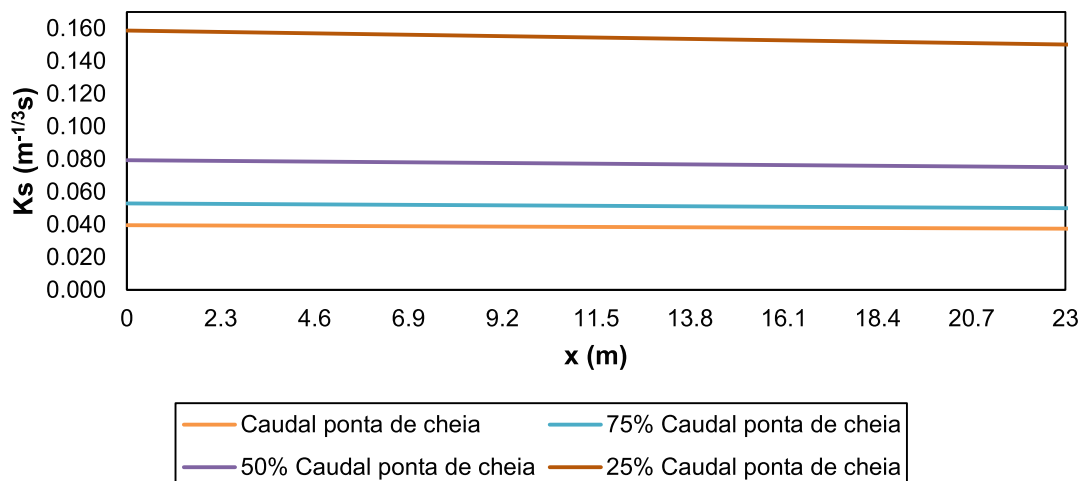


Figura 122 - Coeficiente de rugosidade folha programada J. Gomes - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Rochas

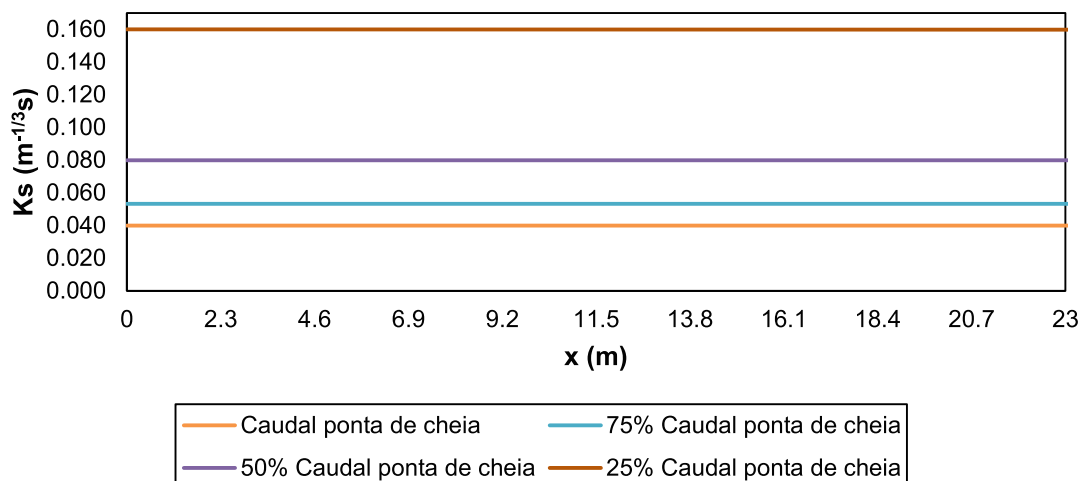


Figura 123 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo J. Gomes - Rochas

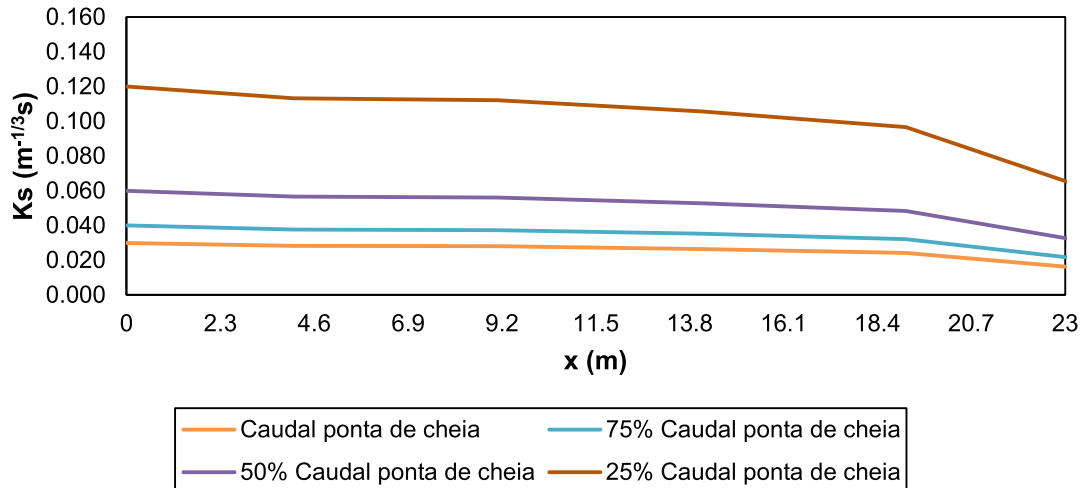


Figura 124 - Coeficiente de rugosidade modelo J. Gomes - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade Média J. Gomes - Rochas

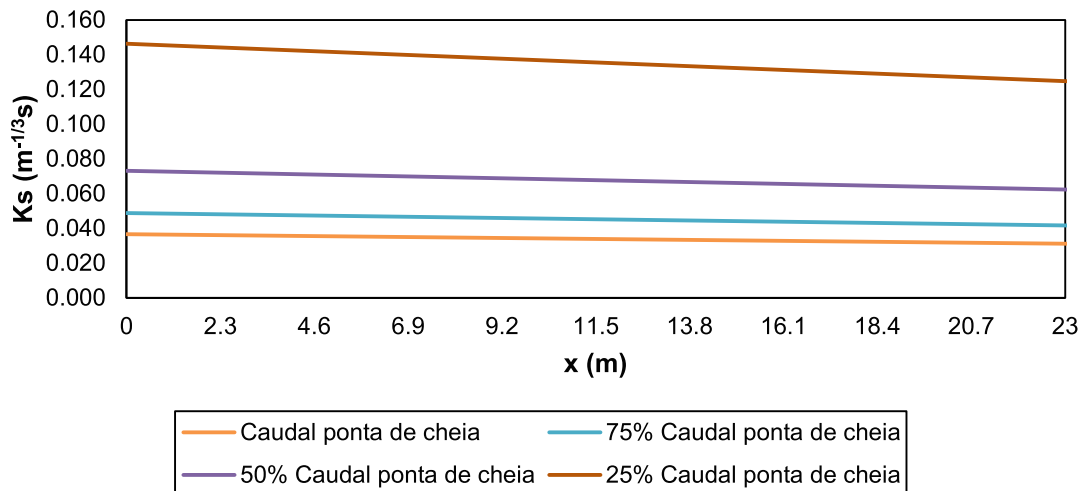


Figura 125 - Coeficiente de rugosidade média J. Gomes - Rochas.

Variação do coeficiente de rugosidade Folha Programada J. Gomes - Misto

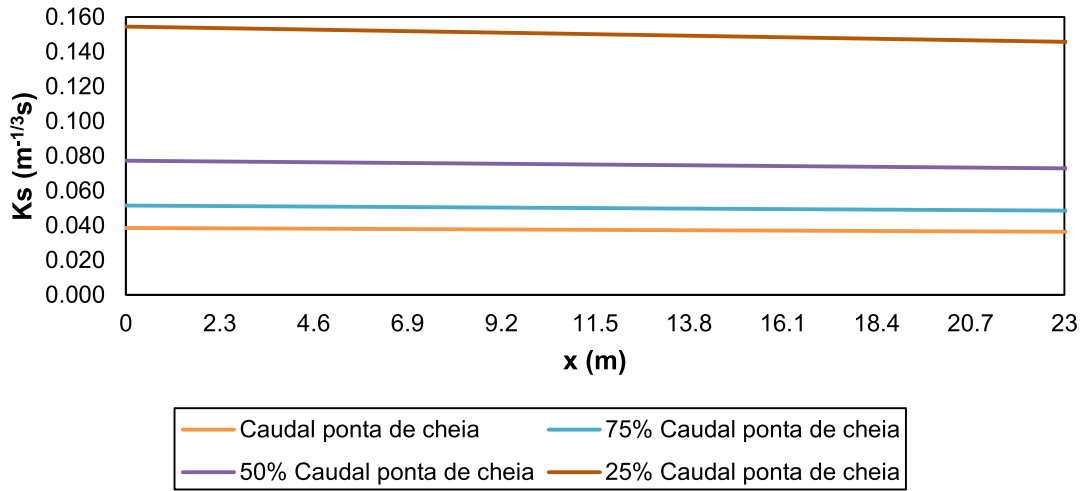


Figura 126 - Coeficiente de rugosidade folha programada J. Gomes - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Misto

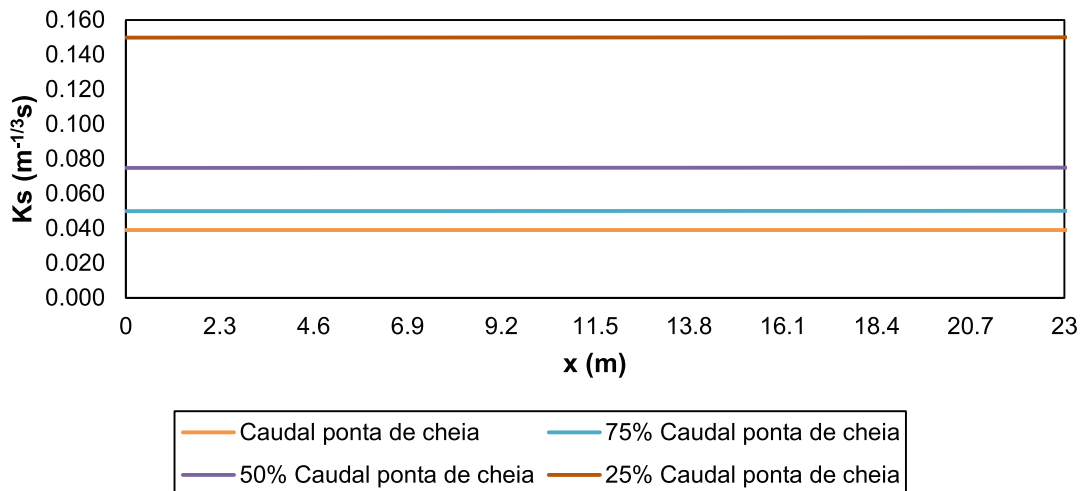


Figura 127 - Coeficiente de rugosidade HEC-RAS J. Gomes - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade Modelo J. Gomes - Misto

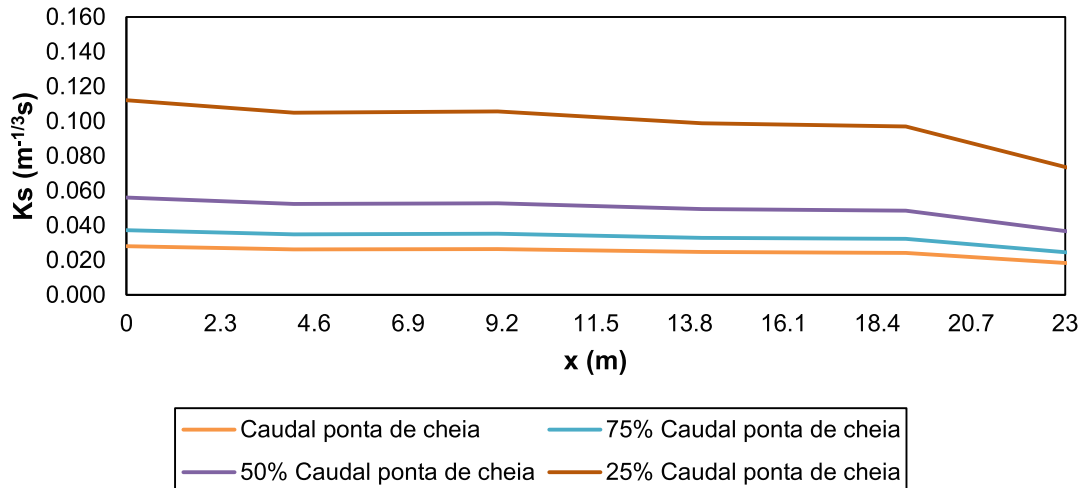


Figura 128 - Coeficiente de rugosidade modelo J. Gomes - Misto.

Variação do coeficiente de rugosidade Média J. Gomes - Misto

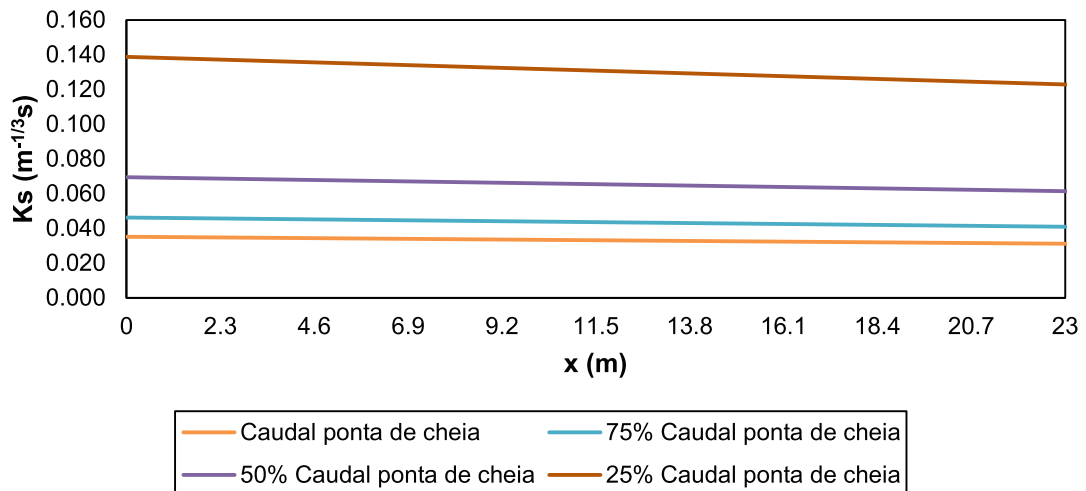


Figura 129 - Coeficiente de rugosidade média J. Gomes - Misto.

ANEXO 4**Cálculo para a obtenção da LPU**

Determinar a partir das amostras de precipitação os vários parâmetros (Média, Desvio-padrão, Coeficiente de variação, Coeficiente de assimetria).

Tabela 37 - Precipitações máximas anuais com a duração d=24 h, para ajuste 1 dia.

Ano hidrológico	P (mm)	ln P
1	113.03	4.73
2	84.44	4.44
3	77.93	4.36
4	154.96	5.04
5	84.94	4.44
6	65.00	4.17
7	129.93	4.87
8	92.64	4.53
9	96.80	4.57
10	60.51	4.10
11	143.28	4.96
12	108.60	4.69
13	177.08	5.18
14	144.32	4.97
15	187.35	5.23
16	60.58	4.10
17	56.22	4.03
Média (mm)	108.1	4.6
Desvio-padrão (mm)	41.6	0.4
Coeficiente de variação	0.385	0.084
Assimetria	0.528	0.037
Assimetria/6	0.088	0.006

Selecionar as leis mais adequadas para distribuição das amostras.

Tabela 38 - Valores da normal reduzida relativa às precipitações máximas anuais em 24 h, para ajuste 1 dia.

N. ordem (i)	Pi	Probabilidade de não excedência, F	Período de retorno, T	Z
	(mm)	$F=i/(N+1)$	anos	Normal reduzida
1	56.22	0.056	1.059	-1.593
2	60.51	0.111	1.125	-1.221
3	60.58	0.167	1.200	-0.967
4	65.00	0.222	1.286	-0.765
5	77.93	0.278	1.385	-0.589
6	84.44	0.333	1.500	-0.431
7	84.94	0.389	1.636	-0.282
8	92.64	0.444	1.800	-0.140
9	96.80	0.500	2.000	0.000
10	108.60	0.556	2.250	0.140
11	113.03	0.611	2.571	0.282
12	129.93	0.667	3.000	0.431
13	143.28	0.722	3.600	0.589
14	144.32	0.778	4.500	0.765
15	154.96	0.833	6.000	0.967
16	177.08	0.889	9.000	1.221
17	187.35	0.944	18.000	1.593

Tabela 39 - Leis Normal, de Gumbel, Galton e de Pearson III, para ajuste 1 dia.

F	T	Lei Normal		Lei de Gumbel		Lei log-Normal ou de Galton		Lei de Pearson III	
	(anos)	KN=z	P (mm)	KG	P (mm)	ln P	P (mm)	KP	P (mm)
0.010	1.010	-2.326	11.2	-1.641	39.8	3.710	40.8	-1.938	27.4
0.020	1.020	-2.054	22.6	-1.514	45.1	3.816	45.4	-1.763	34.7
0.030	1.031	-1.881	29.8	-1.428	48.6	3.883	48.6	-1.647	39.5
0.040	1.042	-1.751	35.2	-1.362	51.4	3.933	51.1	-1.557	43.3
0.050	1.053	-1.645	39.6	-1.306	53.7	3.974	53.2	-1.482	46.4
0.060	1.064	-1.555	43.4	-1.257	55.8	4.009	55.1	-1.417	49.1
0.070	1.075	-1.476	46.7	-1.213	57.6	4.040	56.8	-1.358	51.5
0.080	1.087	-1.405	49.6	-1.172	59.3	4.067	58.4	-1.305	53.7
0.090	1.099	-1.341	52.3	-1.135	60.8	4.092	59.9	-1.257	55.8
0.100	1.111	-1.282	54.7	-1.100	62.3	4.115	61.3	-1.211	57.7
0.110	1.124	-1.227	57.0	-1.067	63.7	4.137	62.6	-1.168	59.5
0.120	1.136	-1.175	59.2	-1.036	65.0	4.157	63.9	-1.128	61.1

Anexos

0.130	1.149	-1.126	61.2	-1.006	66.2	4.176	65.1	-1.089	62.7
0.140	1.163	-1.080	63.1	-0.977	67.4	4.193	66.2	-1.052	64.3
0.150	1.176	-1.036	64.9	-0.949	68.6	4.210	67.4	-1.017	65.8
0.160	1.190	-0.994	66.7	-0.922	69.7	4.227	68.5	-0.983	67.2
0.170	1.205	-0.954	68.4	-0.896	70.8	4.242	69.6	-0.950	68.6
0.180	1.220	-0.915	70.0	-0.871	71.9	4.257	70.6	-0.917	69.9
0.190	1.235	-0.878	71.5	-0.846	72.9	4.272	71.7	-0.886	71.2
0.200	1.250	-0.842	73.1	-0.821	73.9	4.286	72.7	-0.856	72.5
0.210	1.266	-0.806	74.5	-0.797	74.9	4.300	73.7	-0.826	73.7
0.220	1.282	-0.772	75.9	-0.773	75.9	4.313	74.7	-0.797	74.9
0.230	1.299	-0.739	77.3	-0.750	76.9	4.326	75.6	-0.768	76.1
0.240	1.316	-0.706	78.7	-0.727	77.8	4.339	76.6	-0.740	77.3
0.250	1.333	-0.674	80.0	-0.705	78.8	4.351	77.6	-0.712	78.4
0.260	1.351	-0.643	81.3	-0.682	79.7	4.363	78.5	-0.685	79.6
0.270	1.370	-0.613	82.6	-0.660	80.6	4.375	79.4	-0.658	80.7
0.280	1.389	-0.583	83.8	-0.638	81.5	4.387	80.4	-0.632	81.8
0.290	1.408	-0.553	85.1	-0.616	82.4	4.398	81.3	-0.606	82.9
0.300	1.429	-0.524	86.3	-0.595	83.3	4.409	82.2	-0.580	83.9
0.310	1.449	-0.496	87.5	-0.573	84.2	4.420	83.1	-0.554	85.0
0.320	1.471	-0.468	88.6	-0.552	85.1	4.431	84.0	-0.529	86.1
0.330	1.493	-0.440	89.8	-0.530	86.0	4.442	84.9	-0.504	87.1
0.340	1.515	-0.412	90.9	-0.509	86.9	4.453	85.9	-0.479	88.2
0.350	1.538	-0.385	92.1	-0.488	87.8	4.463	86.8	-0.454	89.2
0.360	1.563	-0.358	93.2	-0.467	88.7	4.474	87.7	-0.429	90.2
0.370	1.587	-0.332	94.3	-0.446	89.5	4.484	88.6	-0.405	91.3
0.380	1.613	-0.305	95.4	-0.424	90.4	4.494	89.5	-0.380	92.3
0.390	1.639	-0.279	96.5	-0.403	91.3	4.504	90.4	-0.356	93.3
0.400	1.667	-0.253	97.5	-0.382	92.2	4.514	91.3	-0.331	94.3
0.410	1.695	-0.228	98.6	-0.361	93.1	4.524	92.2	-0.307	95.3
0.420	1.724	-0.202	99.7	-0.339	94.0	4.534	93.2	-0.283	96.3
0.430	1.754	-0.176	100.8	-0.318	94.9	4.544	94.1	-0.258	97.3
0.440	1.786	-0.151	101.8	-0.296	95.8	4.554	95.0	-0.234	98.4
0.450	1.818	-0.126	102.9	-0.275	96.7	4.564	96.0	-0.210	99.4
0.460	1.852	-0.100	103.9	-0.253	97.6	4.574	96.9	-0.185	100.4
0.470	1.887	-0.075	105.0	-0.231	98.5	4.584	97.9	-0.161	101.4
0.480	1.923	-0.050	106.0	-0.209	99.4	4.593	98.8	-0.136	102.4
0.490	1.961	-0.025	107.1	-0.187	100.3	4.603	99.8	-0.112	103.4
0.500	2.000	0.000	108.1	-0.164	101.3	4.613	100.8	-0.087	104.5
0.510	2.041	0.025	109.1	-0.142	102.2	4.623	101.7	-0.063	105.5
0.520	2.083	0.050	110.2	-0.119	103.1	4.632	102.7	-0.038	106.5
0.530	2.128	0.075	111.2	-0.096	104.1	4.642	103.8	-0.013	107.6
0.540	2.174	0.100	112.3	-0.073	105.1	4.652	104.8	0.012	108.6
0.550	2.222	0.126	113.3	-0.049	106.1	4.662	105.8	0.038	109.7

Anexos

0.560	2.273	0.151	114.4	-0.025	107.1	4.671	106.8	0.063	110.7
0.570	2.326	0.176	115.4	-0.001	108.1	4.681	107.9	0.089	111.8
0.580	2.381	0.202	116.5	0.024	109.1	4.691	109.0	0.115	112.9
0.590	2.439	0.228	117.6	0.048	110.1	4.701	110.1	0.141	114.0
0.600	2.500	0.253	118.6	0.074	111.2	4.711	111.2	0.168	115.1
0.610	2.564	0.279	119.7	0.099	112.2	4.721	112.3	0.195	116.2
0.620	2.632	0.305	120.8	0.125	113.3	4.731	113.5	0.222	117.3
0.630	2.703	0.332	121.9	0.152	114.4	4.742	114.6	0.249	118.5
0.640	2.778	0.358	123.0	0.179	115.5	4.752	115.8	0.277	119.6
0.650	2.857	0.385	124.1	0.207	116.7	4.762	117.0	0.305	120.8
0.660	2.941	0.412	125.3	0.235	117.9	4.773	118.3	0.334	122.0
0.670	3.030	0.440	126.4	0.263	119.1	4.784	119.5	0.363	123.2
0.680	3.125	0.468	127.6	0.293	120.3	4.794	120.8	0.393	124.4
0.690	3.226	0.496	128.7	0.323	121.5	4.805	122.2	0.423	125.7
0.700	3.333	0.524	129.9	0.354	122.8	4.816	123.5	0.453	127.0
0.710	3.448	0.553	131.1	0.385	124.1	4.828	124.9	0.485	128.3
0.720	3.571	0.583	132.4	0.418	125.5	4.839	126.3	0.517	129.6
0.730	3.704	0.613	133.6	0.451	126.9	4.851	127.8	0.549	131.0
0.740	3.846	0.643	134.9	0.486	128.3	4.863	129.4	0.583	132.4
0.750	4.000	0.674	136.2	0.521	129.8	4.875	130.9	0.617	133.8
0.760	4.167	0.706	137.5	0.558	131.3	4.887	132.6	0.653	135.3
0.770	4.348	0.739	138.9	0.596	132.9	4.900	134.2	0.689	136.8
0.780	4.545	0.772	140.2	0.636	134.6	4.913	136.0	0.726	138.3
0.790	4.762	0.806	141.7	0.677	136.3	4.926	137.8	0.765	139.9
0.800	5.000	0.842	143.1	0.719	138.0	4.939	139.7	0.805	141.6
0.810	5.263	0.878	144.6	0.764	139.9	4.954	141.7	0.846	143.3
0.820	5.556	0.915	146.2	0.811	141.9	4.968	143.8	0.889	145.1
0.830	5.882	0.954	147.8	0.860	143.9	4.983	145.9	0.934	147.0
0.840	6.250	0.994	149.5	0.912	146.1	4.999	148.2	0.981	148.9
0.850	6.667	1.036	151.2	0.967	148.3	5.015	150.7	1.030	151.0
0.860	7.143	1.080	153.1	1.025	150.8	5.032	153.3	1.081	153.1
0.870	7.692	1.126	155.0	1.087	153.3	5.050	156.0	1.136	155.4
0.880	8.333	1.175	157.0	1.154	156.1	5.069	159.0	1.194	157.8
0.890	9.091	1.227	159.2	1.226	159.1	5.089	162.2	1.256	160.4
0.900	10.000	1.282	161.4	1.305	162.4	5.110	165.7	1.323	163.2
0.911	11.236	1.347	164.2	1.400	166.4	5.136	170.0	1.404	166.5
0.912	11.364	1.353	164.4	1.409	166.8	5.138	170.4	1.411	166.8
0.913	11.494	1.359	164.7	1.419	167.2	5.141	170.8	1.419	167.2
0.914	11.628	1.366	165.0	1.428	167.5	5.143	171.2	1.427	167.5
0.915	11.765	1.372	165.2	1.438	167.9	5.145	171.7	1.435	167.8
0.916	11.905	1.379	165.5	1.447	168.3	5.148	172.1	1.443	168.2
0.917	12.048	1.385	165.8	1.457	168.8	5.150	172.5	1.451	168.5
0.918	12.195	1.392	166.0	1.467	169.2	5.153	173.0	1.459	168.8

Anexos

0.919	12.346	1.398	166.3	1.477	169.6	5.156	173.4	1.467	169.2
0.920	12.500	1.405	166.6	1.487	170.0	5.158	173.9	1.476	169.5
0.921	12.658	1.412	166.9	1.497	170.4	5.161	174.3	1.484	169.9
0.922	12.821	1.419	167.2	1.508	170.9	5.163	174.8	1.493	170.2
0.923	12.987	1.426	167.4	1.518	171.3	5.166	175.2	1.501	170.6
0.924	13.158	1.433	167.7	1.529	171.7	5.169	175.7	1.510	171.0
0.925	13.333	1.440	168.0	1.539	172.2	5.172	176.2	1.519	171.3
0.926	13.514	1.447	168.3	1.550	172.6	5.174	176.7	1.528	171.7
0.927	13.699	1.454	168.6	1.561	173.1	5.177	177.2	1.537	172.1
0.928	13.889	1.461	168.9	1.572	173.6	5.180	177.7	1.546	172.4
0.929	14.085	1.468	169.2	1.584	174.0	5.183	178.2	1.555	172.8
0.930	14.286	1.476	169.5	1.595	174.5	5.186	178.7	1.564	173.2
0.931	14.493	1.483	169.8	1.607	175.0	5.189	179.2	1.574	173.6
0.932	14.706	1.491	170.2	1.619	175.5	5.192	179.7	1.583	174.0
0.933	14.925	1.499	170.5	1.631	176.0	5.194	180.3	1.593	174.4
0.934	15.152	1.506	170.8	1.643	176.5	5.198	180.8	1.603	174.8
0.935	15.385	1.514	171.1	1.655	177.0	5.201	181.4	1.613	175.2
0.936	15.625	1.522	171.5	1.668	177.5	5.204	181.9	1.623	175.6
0.937	15.873	1.530	171.8	1.680	178.0	5.207	182.5	1.633	176.1
0.938	16.129	1.538	172.1	1.693	178.6	5.210	183.1	1.643	176.5
0.939	16.393	1.546	172.5	1.706	179.1	5.213	183.7	1.654	176.9
0.940	16.667	1.555	172.8	1.720	179.7	5.216	184.3	1.664	177.4
0.941	16.949	1.563	173.2	1.733	180.2	5.220	184.9	1.675	177.8
0.942	17.241	1.572	173.5	1.747	180.8	5.223	185.5	1.686	178.3
0.943	17.544	1.580	173.9	1.761	181.4	5.226	186.1	1.697	178.7
0.944	17.857	1.589	174.3	1.775	182.0	5.230	186.7	1.708	179.2
0.945	18.182	1.598	174.6	1.789	182.6	5.233	187.4	1.720	179.7
0.946	18.519	1.607	175.0	1.804	183.2	5.237	188.0	1.731	180.2
0.947	18.868	1.616	175.4	1.819	183.8	5.240	188.7	1.743	180.7
0.948	19.231	1.626	175.8	1.834	184.5	5.244	189.4	1.755	181.2
0.949	19.608	1.635	176.2	1.850	185.1	5.248	190.1	1.767	181.7
0.950	20.000	1.645	176.6	1.866	185.8	5.251	190.8	1.780	182.2
0.951	20.408	1.655	177.0	1.882	186.4	5.255	191.5	1.793	182.7
0.952	20.833	1.665	177.4	1.898	187.1	5.259	192.3	1.805	183.3
0.953	21.277	1.675	177.8	1.915	187.8	5.263	193.0	1.819	183.8
0.954	21.739	1.685	178.2	1.932	188.5	5.267	193.8	1.832	184.4
0.955	22.222	1.695	178.7	1.950	189.3	5.271	194.6	1.845	184.9
0.956	22.727	1.706	179.1	1.968	190.0	5.275	195.4	1.859	185.5
0.957	23.256	1.717	179.6	1.986	190.8	5.279	196.2	1.874	186.1
0.958	23.810	1.728	180.0	2.005	191.6	5.284	197.1	1.888	186.7
0.959	24.390	1.739	180.5	2.024	192.4	5.288	197.9	1.903	187.3
0.960	25.000	1.751	181.0	2.044	193.2	5.292	198.8	1.918	187.9
0.961	25.641	1.762	181.5	2.064	194.0	5.297	199.7	1.933	188.6

Anexos

0.962	26.316	1.774	182.0	2.085	194.9	5.302	200.7	1.949	189.2
0.963	27.027	1.787	182.5	2.106	195.8	5.306	201.6	1.965	189.9
0.964	27.778	1.799	183.0	2.128	196.7	5.311	202.6	1.982	190.6
0.965	28.571	1.812	183.5	2.150	197.6	5.316	203.6	1.999	191.3
0.966	29.412	1.825	184.1	2.173	198.6	5.321	204.6	2.016	192.0
0.967	30.303	1.838	184.6	2.197	199.5	5.326	205.7	2.034	192.8
0.968	31.250	1.852	185.2	2.221	200.6	5.332	206.8	2.052	193.5
0.969	32.258	1.866	185.8	2.246	201.6	5.337	207.9	2.071	194.3
0.970	33.333	1.881	186.4	2.272	202.7	5.343	209.1	2.091	195.1
0.971	34.483	1.896	187.0	2.299	203.8	5.349	210.3	2.111	196.0
0.972	35.714	1.911	187.7	2.327	205.0	5.355	211.6	2.131	196.8
0.973	37.037	1.927	188.3	2.356	206.2	5.361	212.9	2.152	197.7
0.974	38.462	1.943	189.0	2.385	207.4	5.367	214.2	2.174	198.6
0.975	40.000	1.960	189.7	2.416	208.7	5.374	215.6	2.197	199.6
0.976	41.667	1.977	190.4	2.449	210.0	5.380	217.1	2.221	200.6
0.977	43.478	1.995	191.2	2.482	211.4	5.387	218.6	2.245	201.6
0.978	45.455	2.014	191.9	2.517	212.9	5.395	220.2	2.271	202.6
0.979	47.619	2.034	192.8	2.554	214.4	5.402	221.9	2.298	203.7
0.980	50.000	2.054	193.6	2.592	216.0	5.410	223.6	2.325	204.9
0.981	52.632	2.075	194.5	2.633	217.7	5.418	225.5	2.354	206.1
0.982	55.556	2.097	195.4	2.675	219.5	5.427	227.4	2.385	207.4
0.983	58.824	2.120	196.4	2.720	221.3	5.436	229.5	2.417	208.7
0.984	62.500	2.144	197.4	2.768	223.3	5.445	231.6	2.451	210.1
0.985	66.667	2.170	198.4	2.819	225.4	5.455	234.0	2.487	211.6
0.986	71.429	2.197	199.6	2.873	227.7	5.466	236.5	2.525	213.2
0.987	76.923	2.226	200.8	2.931	230.1	5.477	239.1	2.566	214.9
0.988	83.333	2.257	202.1	2.994	232.7	5.489	242.0	2.610	216.7
0.989	90.909	2.290	203.4	3.062	235.6	5.502	245.2	2.657	218.7
0.990	100.000	2.326	204.9	3.137	238.7	5.516	248.6	2.708	220.8
0.991	111.111	2.366	206.6	3.219	242.1	5.531	252.4	2.765	223.2
0.992	125.000	2.409	208.4	3.311	246.0	5.548	256.7	2.827	225.8
0.993	142.857	2.457	210.4	3.416	250.3	5.567	261.6	2.898	228.7
0.994	166.667	2.512	212.7	3.537	255.3	5.588	267.2	2.978	232.1
0.995	200.000	2.576	215.3	3.679	261.3	5.613	273.9	3.072	236.0
0.996	250.000	2.652	218.5	3.853	268.5	5.642	282.1	3.186	240.7
0.997	333.333	2.748	222.5	4.078	277.9	5.679	292.8	3.331	246.8
0.998	500.000	2.878	227.9	4.395	291.1	5.730	308.0	3.531	255.1
0.999	1000.000	3.090	236.7	4.936	313.6	5.812	334.4	3.865	269.0

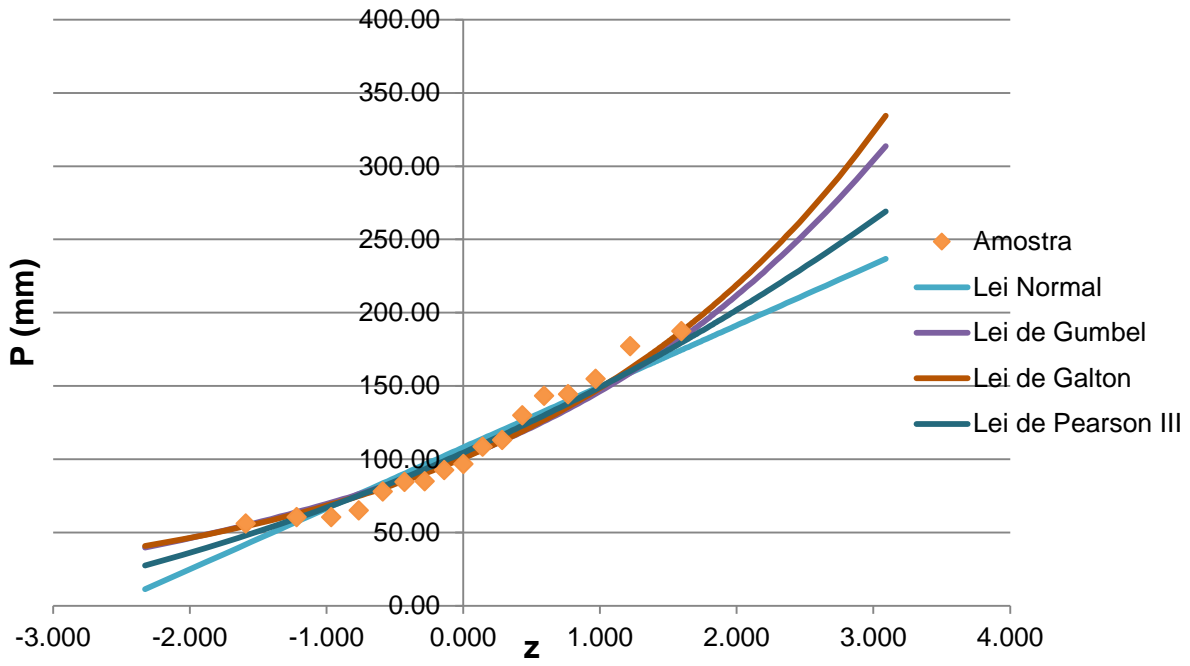


Figura 130 - Lei com melhor ajuste para 1 dia.