

# **ESTUDO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS E ANÁLISE DO SEU IMPACTO EM ALBUFEIRAS**

**MARIA JOSÉ PEREIRA HENRIQUES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

---

Coorientador: Engenheiro Manuel Augusto Oliveira

JULHO DE 2021

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

*“By three methods we may learn wisdom: First, by reflection, which is noblest; Second, by imitation, which is easiest; and third by experience, which is the bitterest.”*

*Confucius*



## **AGRADECIMENTOS**

Com a conclusão desta dissertação, expresso os meus agradecimentos pela oportunidade de participar neste trabalho com o orientador desta dissertação, o Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia, e com o Engenheiro Manuel Augusto Oliveira da EDP Produção. Agradeço não só por todos os conselhos, sugestões e conhecimento transmitido, mas também pelo grande apoio e disponibilidade que mostraram incansavelmente durante toda a realização deste trabalho. O meu muito obrigada pela paciência, incentivo e confiança.

Ao Doutor Engenheiro Bruno Oliveira, pelas sugestões e partilha de informação.

Aos meus pais, avós e irmão pela compreensão e pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos e colegas de faculdade que me acompanharam e fizeram parte desta trajetória.



## RESUMO

Com a intenção de contribuir para a melhoria da qualidade de vida das populações, a construção de barragens e albufeiras irrompeu por todo o mundo, especialmente entre 1950 e 1980. Estas infraestruturas surgiram para responder à crescente necessidade de acesso à água para irrigação, abastecimento urbano e industrial, produção de energia elétrica, mas também para criar condições de navegação fluvial e mitigação de cheias.

Porém, a construção de barragens pode provocar alterações no equilíbrio natural do sistema e nas condições de transporte sólido pré-existentes. Essas alterações poderão passar pela deposição de sedimentos na albufeira, conduzindo ao seu assoreamento e consequente perda de capacidade de armazenamento (alguns autores estimam esta diminuição, em termos médios globais, entre 0,5 e 1,0 por cento ao ano da capacidade total) e estender-se a jusante da barragem com o aumento de erosão no leito e nas margens do rio, consequência da retenção de sedimentos.

Desta forma, é essencial a análise do processo de sedimentação e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas dominadas pelas barragens. O cálculo da erosão hídrica na bacia drenante constitui a base do estudo da produção de sedimentos, podendo ser estimada por uma série de métodos empíricos e semi-empíricos. A fórmula mais conhecida e aplicada é a Equação Universal de Perda de Solo – USLE (*Universal Soil Loss Equation*) e as suas derivadas, a revista RUSLE e a modificada MUSLE.

No presente trabalho, realizado em ambiente empresarial (EDP Produção), o caso de estudo analisado é a bacia hidrográfica do Rio Tâmega, dominada pela barragem do Torrão, que entrou em funcionamento em 1988. Com o foco na estimativa da perda de solo média anual e na produção de sedimentos consequente, a investigação é feita com recurso a mapas de características de solos europeus de alta resolução e à modelação hidrológica com o *software* HEC-HMS do *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bacia hidrográfica; Albufeiras; Erosão; Sedimentação; USLE / RUSLE; Modelação hidrológica HEC-HMS



## **ABSTRACT**

With the intention of contributing to the improvement of the population's quality of life, the construction of dams and reservoirs erupted all over the world, especially between 1950 and 1980. These infrastructures emerged to respond to the growing need for access to water for irrigation, urban and industrial supply, electricity generation, but also to create conditions for river navigation and flood mitigation.

However, the construction of dams can cause changes in the natural balance of the system and in pre-existing solid transport conditions. These changes may involve the deposition of sediments in the reservoir, leading to siltation and consequent loss of storage capacity (some authors estimate this decrease, in a global average, between 0,5 and 1,0 percent per year of total capacity) and extend downstream of the dam with increased erosion of the river bed and banks, as a result of sediment retention.

Thus, it is essential to analyse the sedimentation process and the production of sediments in watersheds dominated by dams. The calculation of water erosion in the drainage basin constitutes the basis for the study of sediment production and can be estimated by a series of empirical and semi-empirical mod. The best known and most applied formula is the Universal Soil Loss Equation – USLE and its derivatives, the revised RUSLE and the modified MUSLE.

In the present work, carried out in a business environment (EDP Produção), the case study analysed is the Tâmega River watershed, dominated by the Torrão dam, which came into operation in 1988. Focusing on the estimation of mean annual soil loss and the consequent sediment production, the investigation is carried using high-resolution European soil characteristics maps and hydrological modeling with the HEC-HMS software of the Hydrologic Engineering Center within the U.S. Army Corps of Engineers.

**KEYWORDS:** Watersheds; Reservoirs; Erosion; Sedimentation; USLE / RUSLE; Hydrological Modeling HEC-HMS



## ÍNDICE GERAL

|                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------|------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                  | i    |
| <b>RESUMO</b> .....                                          | iii  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                        | v    |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                               | xi   |
| <b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....                               | xv   |
| <b>SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS</b> .....              | xvii |
| <br>                                                         |      |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                   | 1    |
| 1.1. ENQUADRAMENTO .....                                     | 1    |
| 1.2. OBJETIVO .....                                          | 2    |
| 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....                             | 2    |
| <br>                                                         |      |
| <b>2. METODOLOGIAS DE CÁLCULO</b> .....                      | 5    |
| 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                              | 5    |
| 2.2. MODELO EMPÍRICO USLE/RUSLE .....                        | 10   |
| 2.2.1. FATOR DE EROSIVIDADE .....                            | 11   |
| 2.2.2. FATOR TOPOGRÁFICO .....                               | 13   |
| 2.2.3. FATOR DE ERODIBILIDADE .....                          | 16   |
| 2.2.4. FATOR DE COBERTURA E PRÁTICAS CULTURAIS .....         | 18   |
| 2.2.5. FATOR DE PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO .....                | 21   |
| 2.2.6. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS .....                          | 23   |
| 2.3. MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA HEC-HMS .....           | 23   |
| 2.3.1. MODELO DE COBERTURA DO SOLO .....                     | 24   |
| 2.3.2. MODELO DE SUPERFÍCIE .....                            | 24   |
| 2.3.3. MODELO DE PERDAS .....                                | 25   |
| 2.3.4. MODELO DE TRANSFORMAÇÃO PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO ..... | 27   |
| 2.3.5. MODELO DE ESCOAMENTO BASE .....                       | 30   |
| 2.3.6. MODELO DE PROPAGAÇÃO .....                            | 31   |
| 2.3.7. MODELO DE EROSIÃO .....                               | 34   |
| 2.3.8. MODELO DE SEDIMENTAÇÃO .....                          | 35   |
| 2.3.9. MODELO DE POTENCIAL DE TRANSPORTE .....               | 36   |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3. CÁLCULO DO VOLUME DE SEDIMENTOS AFLUENTES À ALBUFEIRA DO TORRÃO</b>                           | 39 |
| <b>3.1. CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS</b>                                                                   | 39 |
| <b>3.2. BARRAGEM DO TORRÃO</b>                                                                      | 39 |
| <b>3.3. CARATERIZAÇÃO GERAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TÂMEGA</b>                                 | 41 |
| <b>3.4. ELEMENTOS DE BASE</b>                                                                       | 46 |
| 3.4.1. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO - DEM                                                             | 46 |
| 3.4.2. MAPAS DOS FATORES DO MODELO USLE/RUSLE                                                       | 47 |
| 3.4.3. DADOS HIDRO-METEOROLÓGICOS                                                                   | 48 |
| 3.4.3.1. Precipitações                                                                              | 48 |
| 3.4.3.2. Caudais                                                                                    | 52 |
| <b>3.5. CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PELO MODELO RUSLE</b>                                     | 55 |
| 3.5.1. EROÇÃO HÍDRICA                                                                               | 55 |
| 3.5.1.1. Fator de Erosividade                                                                       | 55 |
| 3.5.1.2. Fator Topográfico                                                                          | 56 |
| 3.5.1.3. Fator de Erodibilidade                                                                     | 57 |
| 3.5.1.4. Fator de Cobertura e Práticas Culturais                                                    | 58 |
| 3.5.1.5. Fator de Práticas de Conservação                                                           | 59 |
| 3.5.1.6. Carta da Erosão e Erosão Média na Bacia                                                    | 60 |
| 3.5.2. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS                                                                       | 62 |
| <b>3.6. CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PELO MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA HEC-HMS</b>          | 62 |
| 3.6.1. MODELO DE PRECIPITAÇÃO - ESCOAMENTO                                                          | 62 |
| 3.6.1.1. Divisão em sub-bacias                                                                      | 63 |
| 3.6.1.2. Modelo Meteorológico                                                                       | 64 |
| 3.6.1.3. Modelo de Cobertura - Método de Cobertura Simples/Simple Canopy                            | 65 |
| 3.6.1.4. Modelo de Superfície - Método de Superfície Simples/Simple Surface                         | 67 |
| 3.6.1.5. Modelo de Perdas - Método de Deficit and Constant Loss                                     | 68 |
| 3.6.1.6. Modelo de Transformação Precipitação Escoamento – Método da Onda Cinemática/Kinematic Wave | 74 |
| 3.6.1.7. Modelo de Escoamento Base – Método Constant Monthly Baseflow                               | 74 |
| 3.6.1.8. Modelo de Propagação – Método de Muskingum-Cunge                                           | 75 |
| 3.6.1.9. Calibração e Verificação do Modelo Hidrológico                                             | 75 |
| 3.6.2. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS                                                                       | 81 |

|                                                            |                |
|------------------------------------------------------------|----------------|
| 3.6.2.1. Modelo de Erosão – Método MUSLE.....              | 81             |
| 3.6.2.2. Modelo de Sedimentação – Método Volume Ratio..... | 82             |
| 3.6.2.3. Simulações para Análises de Sensibilidade.....    | 83             |
| 3.6.2.4. Produção de sedimentos média diária .....         | 89             |
| <b>3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>                   | <b>91</b>      |
| <br><b>4. CONCLUSÕES .....</b>                             | <br><b>93</b>  |
| <br><b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                | <br><b>97</b>  |
| <br><b>ANEXOS .....</b>                                    | <br><b>103</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 - Representação do Ciclo Hidrológico (SAA, 2010) .....                                                                  | 6  |
| Fig. 2 - Esquema de Modelos Hidrológicos, adaptado de (Quintela e Portela, 2002) .....                                         | 7  |
| Fig. 3 - Modelos Empíricos utilizados para o cálculo da Erosão Hídrica do solo .....                                           | 8  |
| Fig. 4 - Taxa de Infiltração, (USACE, 2021).....                                                                               | 26 |
| Fig. 5 - Equação de continuidade, (Miller, 1984) .....                                                                         | 27 |
| Fig. 6 - Volume armazenado num trecho de água (Hipólito e Vaz, 2017).....                                                      | 33 |
| Fig. 7 - Esquema do Modelo de duas camadas, adaptado de (Pak et al., 2008).....                                                | 36 |
| Fig. 8 - Planta da Barragem do Torrão, (CNPGB) .....                                                                           | 40 |
| Fig. 9 - Bacia Hidrográfica do Tâmega .....                                                                                    | 41 |
| Fig. 10 - Carta Geológica à escala 1:500.000, (EDP, 2011).....                                                                 | 43 |
| Fig. 11 - Carta de Uso do Solo do projeto CLC 2018 - Corine-Land Cover .....                                                   | 44 |
| Fig. 12 - Mapa das isolinhas das precipitações médias anuais no período de 1957/58 a 1994/95, (EDP, 2011).....                 | 45 |
| Fig. 13 - DEM obtido a partir de 4 granules na região da bacia hidrográfica do Tâmega, (Earthdata, 2021) .....                 | 47 |
| Fig. 14 - Postos Udométricos selecionados para o estudo.....                                                                   | 49 |
| Fig. 15 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Selecionados entre 01/jan/1980 e 01/jan/1983.....          | 50 |
| Fig. 16 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Selecionados entre 01/jan/1983 e 01/jan/1985.....          | 51 |
| Fig. 17 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Selecionados entre 01/jan/1985 e 01/jan/1987 .....         | 51 |
| Fig. 18 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Selecionados entre 01/jan/1987 e 01/jan/1989.....          | 51 |
| Fig. 19 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Selecionados entre 01/jan/1989 e 01/jan/1991.....          | 52 |
| Fig. 20 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Selecionados entre 01/jan/1991 e 01/jan/1993.....          | 52 |
| Fig. 21 - Estações Hidrométricas selecionadas para o caso de estudo: Fridão e Ponte Cavez .....                                | 53 |
| Fig. 22 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1980 e 01/jan/1983..... | 54 |
| Fig. 23 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1983 e 01/jan/1986..... | 54 |
| Fig. 24 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1986 e 01/jan/1989..... | 54 |

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 25 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1989 e 01/jan/1993 .....                            | 55 |
| Fig. 26 - Fator de Erosividade, R - (Panagos et al., 2015a) .....                                                                                          | 56 |
| Fig. 27 - Fator Topográfico, LS - (Panagos et al., 2015c).....                                                                                             | 57 |
| Fig. 28 - Fator de Erodibilidade, K - (Panagos et al., 2014).....                                                                                          | 58 |
| Fig. 29 - Fator de Cobertura Vegetal e Uso de Solo, C - (Panagos et al., 2015b) .....                                                                      | 59 |
| Fig. 30 - Fator de Conservação, P - (Panagos et al., 2015d) .....                                                                                          | 60 |
| Fig. 31 - Classes de erosão .....                                                                                                                          | 61 |
| Fig. 32 - Valores de Produção de Sedimentos Média Anual na bacia do Tâmega .....                                                                           | 62 |
| Fig. 33 - Divisão de Sub-Bacias .....                                                                                                                      | 63 |
| Fig. 34 - Modelo Concetual da Bacia Hidrográfica do Tâmega .....                                                                                           | 64 |
| Fig. 35 - Áreas de Influência dos Postos Seleccionados na bacia do Tâmega.....                                                                             | 65 |
| Fig. 36 - Classe de Uso de Solo – adaptadas de CLC 2018 .....                                                                                              | 66 |
| Fig. 37 - (%) Declives da bacia do Tâmega .....                                                                                                            | 68 |
| Fig. 38 - Mapa Representativo da % do Teor em Argila na Bacia Hidrográfica do Tâmega .....                                                                 | 70 |
| Fig. 39 - Mapa Representativo da % do Teor em Silte na Bacia Hidrográfica do Tâmega .....                                                                  | 70 |
| Fig. 40 - Mapa Representativo da % do Teor em Areia na Bacia Hidrográfica do Tâmega.....                                                                   | 71 |
| Fig. 41 - Mapa Textura de Solo na Bacia Hidrográfica do Tâmega.....                                                                                        | 71 |
| Fig. 42 - Distribuição da % de Impermeabilidade por classe de solo na bacia do Tâmega .....                                                                | 74 |
| Fig. 43 - Valores de Caudal Base Mensais específicos usados no modelo .....                                                                                | 75 |
| Fig. 44 - Esquema do procedimento de calibração, (USACE, 2021).....                                                                                        | 76 |
| Fig. 45 - Simulação Hidrológica na Sub-bacia TAM01 com “Taxa Constante” = 9.47mm/hr .....                                                                  | 77 |
| Fig. 46 - Simulação Hidrológica na Sub-bacia TAM01 com “Taxa Constante” = 1.3 mm/hr .....                                                                  | 78 |
| Fig. 47 - Caudais simulados (azul) vs Caudais observados na estação hidrométrica Fridão (negro) .                                                          | 80 |
| Fig. 48 - Curva Granulométrica dos solos da bacia do Tâmega.....                                                                                           | 82 |
| Fig. 49 - Curva Granulométrica de referência adotada para o leito das linhas de água, (Gibson e Cai, 2017) .....                                           | 83 |
| Fig. 50 - Produção de Sedimentos Média Anual na bacia do Tâmega, em toneladas/Km <sup>2</sup> /ano, para os diferentes Threshold testados .....            | 85 |
| Fig. 51 - Produção de Sedimentos média anual na bacia do Tâmega, em toneladas/Km <sup>2</sup> /ano, para os diferentes Active Layer Factors testados ..... | 86 |
| Fig. 52 - Produção de Sedimentos média anual na bacia do Tâmega, em toneladas/Km <sup>2</sup> /ano, para os diferentes Bed Depth testados .....            | 87 |
| Fig. 53 - Curvas Granulométricas do Leito do Rio analisadas.....                                                                                           | 88 |

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 54 - Produção de Sedimentos média anual na bacia do Tâmega. em toneladas/Km2/ano, para as diferentes Curvas Granulométricas testadas ..... | 88 |
| Fig. 55 - Produção de Sedimentos Média Diária e Precipitações Diárias de 01/jan/1980 a 01/jan/1993 .....                                        | 90 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Classes de estrutura do solo, derivadas do Banco de Dados Europeu de Solos, (Panagos et al., 2014).....                                                                      | 18 |
| Tabela 2 - Classes de permeabilidade do solo e intervalos de condutividade hidráulica saturada, estimadas a partir das principais classes texturais do solo (Panagos et al., 2014)..... | 18 |
| Tabela 3 - Fator C para diferentes tipos de cultura, (Panagos et al., 2015b).....                                                                                                       | 20 |
| Tabela 4 - Fator C de acordo com a classe de uso de solo, (Panagos et al., 2015b).....                                                                                                  | 21 |
| Tabela 5 - Métodos de Perdas para eventos e simulações contínuas .....                                                                                                                  | 25 |
| Tabela 6 - Postos Udométricos selecionados.....                                                                                                                                         | 48 |
| Tabela 7 - Precipitações Anuais para os postos selecionados.....                                                                                                                        | 50 |
| Tabela 8 - Perda de solo na bacia do Tâmega obtidos através do Modelo RUSLE .....                                                                                                       | 61 |
| Tabela 9 - Valores da Razão de Entrega de Sedimentos estimados para a bacia do Tâmega .....                                                                                             | 62 |
| Tabela 10 - Estimativa da quantidade de água em mm, retidas na interseção com a vegetação (Holberg, 2014).....                                                                          | 66 |
| Tabela 11 - Valores de armazenamento máximos de superfície associados aos declives do terreno (em %).....                                                                               | 67 |
| Tabela 12 - Caraterísticas dos solos propostas por(Rawls, Brakensiek e Miller, 1983).....                                                                                               | 69 |
| Tabela 13 - Dados referentes à Textura de Solo na Bacia do Tâmega.....                                                                                                                  | 72 |
| Tabela 14 - Classificação de Impermeabilidade conforme Classe de Uso de Solo na Bacia do Tâmega .....                                                                                   | 73 |
| Tabela 15 - Valores do parâmetro “Taxa Constante” considerada no Modelo de Perdas .....                                                                                                 | 77 |
| Tabela 16 - Performance do Modelo.....                                                                                                                                                  | 79 |
| Tabela 17 - Performance do Modelo segundo os descritores NSE, RMSE e %Bias .....                                                                                                        | 79 |
| Tabela 18 - Valores atribuídos aos parâmetros comuns às sub-bacias que constituem a bacia do Tâmega .....                                                                               | 81 |
| Tabela 19 - Parâmetros e métodos selecionados para análises de sensibilidade .....                                                                                                      | 83 |
| Tabela 20 - Valores de perda de solo obtidos através do HEC-HMS, para diferentes Threshold,(modelo MUSLE) e obtidos a partir do modelo RUSLE.....                                       | 84 |



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

A - Perda de solo calculada por unidade de área por tempo [ $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ]

R - Fator da erosividade das chuvas [ $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$ ]

K - Fator erodibilidade do solo [ $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ]

L - Fator comprimento da vertente [adimensional]

S - Fator da declividade da vertente [adimensional]

LS – Fator Topográfico

C - Fator de gestão de culturas (técnicas de cultivo) ou fator de técnica cultural [adimensional]

P - Fator do método de controlo de erosão ou fator de prática de conservação [adimensional]

$E_c$  - Energia cinética da precipitação [ $MJ\ ha^{-1}$ ]

$I_{30}$  - Intensidade máxima de precipitação durante 30 minutos para uma intempérie [ $mm\ h^{-1}$ ]

$EI_{30}$  - Índice de erosividade

$H_i$  - Altura de precipitação [mm]

$I_i$  - Intensidade de precipitação do acontecimento pluviométrico [ $mm\ h^{-1}$ ]

$T_i$  – Período do intervalo  $i$  [h]

$i$  - Intervalo de tempo genérico

$e_i$  é a unidade de energia da precipitação [ $MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ ]

$v_i$  é o volume de precipitação [mm] durante um período de tempo  $i$  [h]

P - Precipitação média anual [mm]

$x$  - Extensão da encosta [m]

$s$  - Inclinação longitudinal

$m$  - Expoente do comprimento de encostas

$\beta$  - Razão entre a erosão nos sulcos

$\theta$  - Declive da encosta [°]

$x_j$  - Distância entre o topo do troço inclinado até ao extremo inferior do  $j$ -ésimo segmento [m]

$x_{j-1}$  - Comprimento do troço inclinado desde o topo até ao extremo superior do  $j-1$ -ésimo segmento [m]

$x_e$  - Comprimento total do troço inclinado [m]

$S_j$  - Valor do fator de inclinação longitudinal para o segmento  $j$

$g$  - Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ]

$A_{i,j}$  - Área de fluxo acumulado para cada célula com coordenadas  $(i,j)$

$D_c$  - Resolução das células

M - Fator referente à textura do solo

$m_c$  - Teor de fração de argila [%]

$m_{silt}$  - Conteúdo da fração de silte [%]

$m_{vfs}$  - Teor da fração de areia muito fina [%]

$a$  - Conteúdo de matéria orgânica [%]

$b$  - Código/Classe da Estrutura do solo

$c$  - Código/Classe de Permeabilidade do solo.

$K_{eg}$  - Fator K corrigido pela presença dos elementos grosseiros à superfície

$K_{tf}$  - Fator K (estimado apenas para a terra fina)

$EG$  - Cobertura superficial do solo por elementos grosseiros [%]

$RC$  - Cobertura pedregosa [%]

$C_{ara}$  - Fator C para terras aráveis

$C_{crop}$  - Fator C com base na composição da cultura de uma área agrícola

$C_{mant}$  – Fator C resultado da influência das práticas de gestão

$C_{til}$  - Fator C resultado da influência de efeitos de práticas de cultura

$C_{res}$  - Fator C resultado da influência dos resíduos de plantas

$C_{cov}$  - Fator C resultado da influência da cobertura de culturas

$P_c$  - Subfator de contorno para uma dada inclinação de um campo

$P_{sw}$  - Subfator de stone walls - terraceamento

$P_{gm}$  - Subfator de grass margins - cultivo em faixas de proteção.

pelo "Hydrologic Engineering Center (HEC) do United States Army Corps of Engineers.

$F_c$  - Constante ao longo de um evento

$I_a$  - Perda inicial

$p_{et}$  - Precipitação útil

$p_t$  - Precipitação média durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ,

$p_i$  - Dados observados ao tempo  $t_i$

$\Delta x$  - Distância que separa duas secções transversais no volume de controlo

$A$  - Área da secção transversal de escoamento

$B$  - Largura superficial da secção transversal

$h$  - Altura da superfície da água acima do datum

$q$  - Descarga por unidade de comprimento

$Q$  - Caudal que atravessa a secção transversal

$t$  - Tempo

$v$  - Velocidade do escoamento

$x_h$  - Distância horizontal

$y$  - Profundidade do escoamento vertical

$p$  é a intensidade de precipitação sobre a superfície livre

$E_1$  - Momento estático da secção transversal em relação à superfície livre;

$E_2$  - Derivada parcial do momento estático  $E_1$ ;

$S_f$  - Perda de carga unitária;

$S_0$  - Declive do fundo do canal

$h_e$  - Altura de escoamento

$K_t$  - Capacidade de transporte da secção transversal

$K_S$  - Coeficiente de Strickler

$n$  - Coeficiente de Manning

$C_h$  - Coeficiente de Chézy

$I_t$  - Hidrograma de entrada

$Q_t$  - Hidrograma de saída

$Q_l$  - Contribuição lateral do trecho

$I$  - Média afluente durante o intervalo de tempo  $\Delta t$

$O$  - Média efluente durante  $\Delta t$

$S$  - Armazenamento de água num trecho

$K$  - Tempo de propagação entre a secção de entrada e a secção de saída.

$C$  - Número de Courant

$\mu_h$  e  $\mu_n$  - Coeficientes de difusão numérica

$c$  – Celeridade

$S_{ed}$  – Perda de solo num determinado evento [t]

$a$  e  $b$  - Coeficientes de ajuste [adimensionais]

$S_{es}$  - Potencial de infiltração máximo após o início do escoamento superficial

$Q_{surf}$  - Volume de escoamento superficial do evento

$q_{peak}$  - Caudal de pico do evento

$V_{es}$  - Volume de escoamento superficial [mm]

$T_p$  - Tempo de pico do hidrograma [h]

$F_{gr}$  número de mobilidade

$\rho$  - Densidade do material sólido

$y_m$  - Profundidade média

$n$  - Expoente que depende da granulometria dos sedimentos

D/D35 - Diâmetro equivalente - diâmetro do grão, para o qual 35% do material do leito, é mais fino

$D_{gr}$  - Diâmetro dos grãos

$G_{gr}$  - Potencial de transporte de sedimentos

Z - Limiar de mobilidade

C e m - Coeficientes empíricos

$u^*$  - Velocidade de Atrito

X - Fluxo de sedimentos

$D_e$  - Profundidade efetiva

$O_i$  - Caudal observado

$P_i$  - Caudal obtido por simulação através do modelo

$\bar{\delta}$  - Caudal médio observado no período de simulação

$\bar{\phi}$  - Caudal médio simulado no período de simulação

$\rho_s$  - Densidade de um grão de quartzo

$\rho_f$  - Densidade do fluído

d - Diâmetro da partícula

$\eta$  - Coeficiente de viscosidade

USLE – Universal Soil Loss Equation

EUPS – Equação Universal de Perda de Solo

RUSLE – Revised Soil Loss Equation

MUSLE – Modified Soil Loss Equation

HEC-HMS - Hydrology Engineering Center - Hydrologic Modeling System

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

USDA – United States Department of Agriculture

ARS – Agricultural Research Service

SCS – Soil Conservation Service

SOMs - Self-Organizing Maps

ANN - Artificial Neural Network

LPMS - Lumped Parameter Models

SLEMSA - Soil Loss Estimation Model for Southern Africa

CREAMS - Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System

GLEAMS - Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems

EPIC - Environmental Policy Integrated Climate

DPMs - Distributed Parameter Models

WEPP - Water Erosion Prediction Project

EUROSEM - European Soil Erosion Model

MEDALUS - Mediterranean Desertification and Land Use

SWAT - Soil and Water Assessment Tool

LANDUM - Land Use and Management Model

ESDAC - European Soil Data Center

JRC - Joint Research Centre

CLC – CORINE Land Cover

LUCAS - Land Use and Coverage Area frame Survey

SDR - Sediment Delivery Ratio

CN – Curve Number/Número de escoamento

DEM – Digital Elevation Model

GDEM - Digital Elevation Model

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) [Japão]

NASA (National Aeronautics and Space Administration) [Estados Unidos]

AIRS - Atmospheric Infrared Sounder

NUTS - Nomenclatura de Unidades Territoriais Estatísticas

NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency

RMSE - Root Mean Square Error

PBIAS - Percent Bias

TAM - Designação da sub-bacia

REAC - Designação da linha de água

Fig. - Figura



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A água no seu movimento ao longo de uma bacia hidrográfica, flui sobre ou no interior dos solos que formam ou revestem as suas encostas e as linhas de água da rede de drenagem. Os obstáculos que então encontra determinam os caminhos que a água vai seguir e a velocidade com que se desloca, e dissipam boa parte da energia de que está provida, ao propiciar que partículas sólidas sejam removidas e transportadas pelas encostas ou rio abaixo (Tucci, 2000).

Assim, paralelamente ao ciclo hidrológico existe outro ciclo intimamente ligado e totalmente dependente, que envolve o deslocamento, o transporte e a sedimentação de partículas sólidas presentes na superfície da bacia. Por analogia com o ciclo da água, este é designado por ciclo hidrossedimentológico, apesar de ao contrário da água os sedimentos não terem como regressar ao meio de onde provêm.

Com o passar do tempo, os processos em ação no ciclo hidrossedimentológico acabam por moldar as formas das bacias hidrográficas, dando-lhes as características que hoje conhecemos: perfis das linhas de água mais suaves que originalmente, em decorrência da erosão das cabeceiras e da formação de depósitos nas partes mais baixas; rede de drenagem mais densa e mais encaixada na parte superior da bacia do que na parte inferior, cercada por várzeas cuja extensão lateral aumenta geralmente com a aproximação à sua foz; leitos que vão se alargando de montante para jusante, e cujo o material do fundo vem simultaneamente diminuindo de tamanho.

Todas essas formas resultam de um demorado processo de adaptação, produto da degradação lenta do relevo sob ação dos processos presentes no ciclo hidrossedimentológico, e sem influência do homem. No sistema fluvial assim criado predominam a erosão no trecho superior da rede de drenagem, o transporte no trecho médio e o depósito no trecho inferior. Onde existe solo, a erosão nas encostas processa-se em ritmo compatível com a formação do mesmo, garantindo dessa forma a evolução equilibrada do sistema.

A presença e a ação do homem podem alterar esse quadro. As suas inúmeras atividades podem acelerar a erosão natural das encostas, aumentar as ações agressivas sobre os canais dos rios e aumentar os depósitos e a instabilidade dos leitos fluviais. Entre as atividades que mais afetam o ciclo hidrossedimentológico destacam-se o desmatamento, a agricultura, a urbanização, a mineração, a construção de estradas, e a regularização dos cursos de água com a construção de barragens.

Os riscos ou prejuízos criados pela ação do homem podem ficar restritos ao local da intervenção, ou propagar-se ainda para áreas mais a jusante. As alterações daí decorrentes podem ser imediatas ou desenvolver-se lentamente ao longo do tempo.

Os riscos de degradação dos solos, dos leitos dos rios e dos ecossistemas fluviais e estuarinos, ou de contaminação dos sedimentos por produtos químicos, levaram a que se desse atenção aos problemas que podem decorrer das alterações do ciclo hidrossedimentológico natural. Assim, nas últimas décadas, foram desenvolvidos vários modelos de cálculo com a finalidade de representar e quantificar os processos de destacamento, transporte e deposição de solo erodido.

No presente trabalho, que teve lugar em ambiente empresarial, na empresa EDP Produção, mais concretamente no Departamento de Hidráulica da Direção de Engenharia de Barragens, o tema analisado foi a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Tâmega dominada pela barragem do Torrão.

Este tema enquadra-se num estudo mais abrangente que está atualmente em curso na EDP Produção sobre sedimentação nas albufeiras do Douro, que visa compreender o seu eventual impacto na diminuição da carga sólida na deriva litoral de sedimentos.

## **1.2. OBJETIVOS**

O trabalho proposto pretende sistematizar, aplicar e comparar algumas das principais metodologias disponíveis para estimar o volume de sedimentos produzidos numa bacia hidrográfica que podem afluir a uma albufeira.

Para atingir esse objetivo, o trabalho a desenvolver propõe-se analisar o caso de estudo da albufeira do Torrão, para a qual existem disponíveis alguns dados sobre o volume de sedimentos depositados.

A análise focar-se-á na aplicação da fórmula universal de perda dos solos à bacia hidrográfica do rio Tâmega dominada pela barragem do Torrão, através de duas vias distintas, para posterior comparação de resultados.

A primeira via irá recorrer a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), capazes de integrar redes de dados mais complexos para obter mapeamento de resultados. São exemplos destes mapas, os produzidos pelo Centro de Pesquisa da Comissão Europeia, na ESDAC, *European Soil Data Centre*, cuja base de dados está disponível em formatos *raster* para SIG.

A segunda via irá recorrer à simulação hidrológica, utilizando o programa de cálculo automático HEC-HMS, versão 4.7.1, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *United States Army Corps of Engineers*, que permite estimar a produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica a partir da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) e inclui vários métodos para avaliar tanto o transporte de sedimentos, como os fenómenos de erosão e deposição na rede hidrográfica.

## **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho encontra-se organizado em 4 capítulos.

No presente Capítulo 1 apresenta-se o enquadramento geral do tema a desenvolver, os objetivos definidos e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 consta numa síntese sobre as metodologias de cálculo usadas neste trabalho para a determinação da produção de sedimentos: o modelo empírico da fórmula universal de perda dos solos, e o modelo de simulação hidrológica HEC-HMS.

O Capítulo 3 apresenta os cálculos da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Tâmega. For fim, o Capítulo 4 expõe as conclusões.



# 2

## METODOLOGIAS DE CÁLCULO

### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os modelos hidrológicos são, por definição, representações simplificadas de sistemas hidrológicos reais, que permitem a análise do funcionamento de bacias hidrográficas e a sua resposta a uma série de fenómenos, de forma a obter uma melhor compreensão dos processos envolvidos. Estes modelos também possibilitam a previsão de respostas hidrológicas a várias práticas de gestão de bacias hidrográficas (Arabi et al., 2008).

O objetivo para o qual o modelo é utilizado, influencia a escolha do mesmo. Dada a grande variabilidade das características físicas e climáticas das bacias hidrográficas, um modelo dificilmente atenderá às condições de todos os sistemas. Portanto, para a escolha de um modelo é necessário conhecer as vantagens e desvantagens de cada um, as técnicas para a sua utilização e os algoritmos existentes.

A disponibilidade de dados é um fator preponderante na escolha do modelo, pois alguns destes podem ser inviabilizados por exigirem muita informação, enquanto outros, que utilizam poucos parâmetros relacionados com determinados indicadores, podem ser mais úteis.

Os modelos hidrológicos apresentam tipologia diversa (Moriasi et al., 2012). Assim, podem-se distinguir os modelos tendo em conta a sua génese (empírica, concetual ou de processos físicos) e o seu objetivo (simulação ou otimização). No que diz respeito à discretização espacial, as arquiteturas variam de agregadas a distribuídas. O tempo é também uma dimensão relevante, determinando modelos ideais para aplicação em eventos isolados ou em simulações contínuas.

Na verdade, os modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia hidrográfica em escoamento, numa determinada secção de um rio. O conhecimento foi inicialmente fragmentado pela análise de cada um dos processos envolvidos no ciclo hidrológico, como a avaliação da precipitação, intercetção vegetal, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço de água nas camadas superior e inferior do solo e os escoamentos superficial, subterrâneo e em rios, canais e lagos (Tucci, 2010). Este ciclo (Fig. 1), que tem a radiação solar como fonte de energia e o campo gravitacional terrestre como principal força atuante, é uma característica importante de todos os ecossistemas, sendo também o processo que mais condiciona a química natural da água. Quando a precipitação cai sobre a terra, as gotas da chuva podem seguir vários caminhos. À medida que a água escoia pela superfície da terra, esta pode infiltrar-se no solo, bem como constituir corpos de água superficiais. Grande parte desta água superficial irá evaporar, e uma vez de volta à atmosfera, poderá resultar numa nova precipitação. Por outro lado, uma vez no solo, a água pode ser absorvida pelas plantas e evaporada por transpiração das mesmas, ou ainda continuar a infiltrar-se para formar zonas saturadas de água no subsolo - aquífero. A taxa de infiltração

de água é afetada pela densidade e profundidade dos canais radiculares e resíduos orgânicos incorporados no solo.

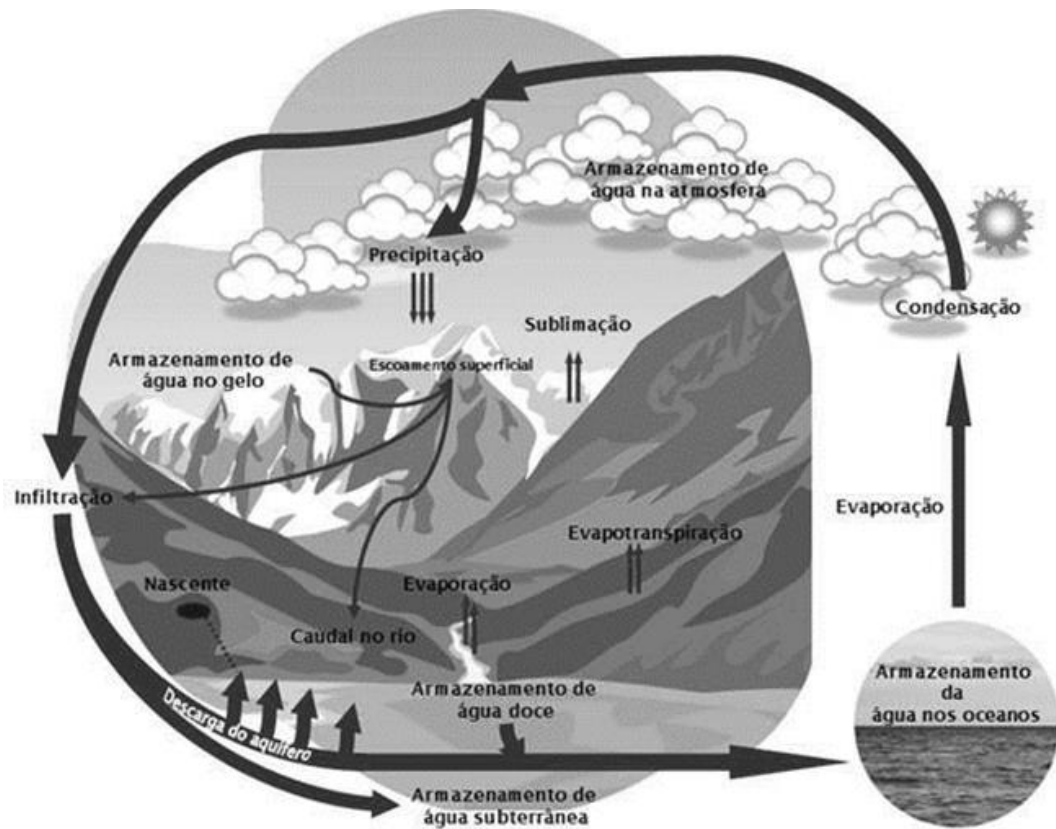


Fig. 1 - Representação do Ciclo Hidrológico (SAA, 2010)

Os grandes avanços na modelação hidrológica tiveram início em 1930, quando agências governamentais começaram a desenvolver os seus próprios programas de pesquisas hidrológicas. Os modelos desenvolvidos nessas pesquisas descreviam, assim, os processos de cada componente do ciclo hidrológico. Em 1932, Sherman desenvolveu o Hidrograma Unitário. Em 1933, Horton desenvolveu a Teoria da Infiltração e, com o aumento da disponibilidade de computadores, no final da década de 50, criaram-se condições que propiciaram um acelerado processo de desenvolvimento de modelos hidrológicos, baseados em conceitos físicos. Com a disseminação do uso de computadores nas décadas de 1960 e 1970 e a maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos, a abordagem espacial distribuída começou a ser aplicada na modelação hidrológica. Desde então, diversos modelos têm sido desenvolvidos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação (Almeida e Serra, 2017).

Os modelos hidrológicos podem, assim, classificar-se quanto à sua génese, de acordo com o esquematizado na (Fig. 2).

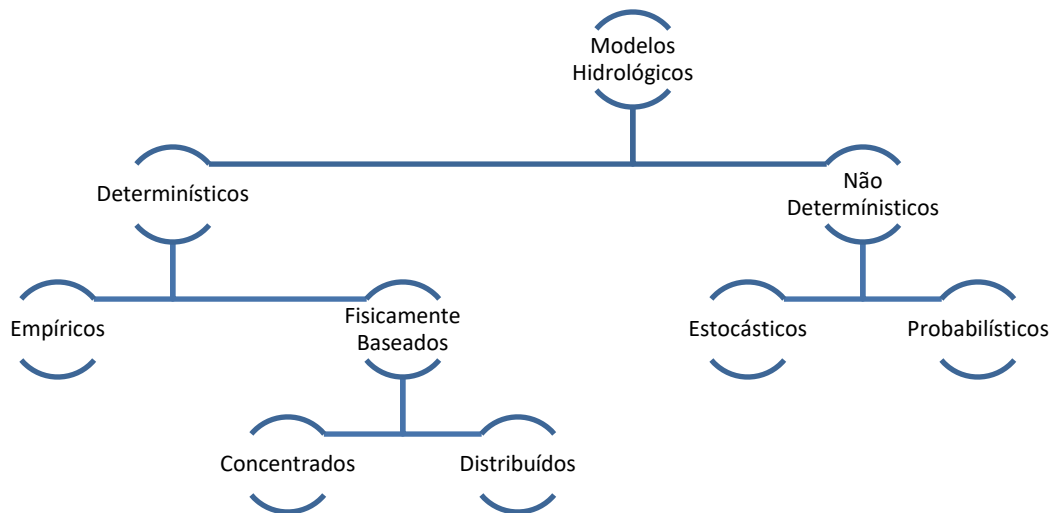


Fig. 2 - Esquema de Modelos Hidrológicos, adaptado de (Quintela e Portela, 2002)

Os modelos hidrológicos podem classificar-se como determinísticos e não determinísticos. Os modelos determinísticos são aqueles que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entrada, mesmo quando uma variável de entrada tem caráter aleatório, e podem dividir-se em modelos empíricos e modelos fisicamente baseados. Os modelos são ditos empíricos quando a sua formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia hidrográfica e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análises de regressão. Os modelos fisicamente baseados utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos hidrológicos, sendo os seus parâmetros aqueles que mais se aproximam da física do sistema. Assim, as mudanças das características das bacias hidrográficas podem alterar os valores dos parâmetros, que podem ser avaliados através de medidas de campo. Os modelos fisicamente baseados podem dividir-se ainda em modelos concentrados/pontuais/agregados ou modelos distribuídos. Nos modelos concentrados, a área da bacia hidrográfica é representada de forma única e homogênea. No seu desenvolvimento são atribuídos valores médios representativos dos parâmetros do modelo. Já os modelos distribuídos permitem que toda a área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados. Este tipo de modelo permite a manipulação de dados de pluviometria, tendo em consideração a sua variabilidade espacial (Almeida e Serra, 2017).

No que respeita aos modelos não determinísticos, estes podem ser considerados modelos estocásticos ou modelos probabilísticos. Os modelos são considerados estocásticos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelação têm um comportamento aleatório e uma componente determinística, que permite contemplar a sequência temporal ou espacial dos valores das variáveis. Já nos modelos probabilísticos, as variáveis intervenientes têm comportamento puramente aleatório e é, portanto, ignorada a sequência temporal ou espacial dos valores dessas variáveis (Quintela e Portela, 2002).

Os modelos hidrológicos podem ainda classificar-se como contínuos ou discretos e estacionários ou dinâmicos. Os modelos hidrológicos discretos são aqueles que pretendem modelar períodos isolados de uma série temporal, com o intuito de representar eventos, nomeadamente de cheia. Já os modelos contínuos pretendem a simulação de longos períodos da série, examinando comportamentos hidrológicos diferentes, ao longo da janela de tempo pretendida. No que respeita à classificação de

modelos estacionários ou dinâmicos, a principal diferença entre estes modelos reside no facto de que os modelos hidrológicos estacionários descrevem apenas um fenómeno num determinado momento e os seus parâmetros não variam com o tempo.

A hidrossedimentologia estuda os processos relacionados com a dinâmica da água e dos sedimentos no ciclo hidrológico, bem como possíveis interações dessas partículas com o meio ambiente, analisando o destacamento e transporte dos sedimentos pelo escoamento superficial. A hidrossedimentologia não se foca apenas nos processos de erosão, analisando também a deposição das partículas erodidas e o assoreamento em rios, lagos e albufeiras.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos vários modelos (empíricos, conceituais ou físicos) com a finalidade de representar e quantificar os processos de destacamento, transporte e deposição de solo erodido, para implementação de ferramentas de avaliação para fins educacionais, legislativos e de planeamento (Renschler e Harbor, 2002).

Efetivamente, as pesquisas sobre a perda de solo podem compreender metodologias diversas, que vão desde simples constatações, ou seja, quando o fenómeno se torna demasiado evidente, ou avaliações empíricas, com aplicação de fórmulas reconhecidas internacionalmente (Ferreira, 2013).

Originalmente, os métodos para estimar a produção de sedimentos foram desenvolvidos com o intuito de analisar os efeitos das práticas agrícolas no solo. Os modelos empíricos destacavam-se pela sua simplicidade e facilidade de aplicação na avaliação da erosão do solo e na produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

O Modelo USLE, *Universal Soil Loss Equation* ou EUPS, *Equação Universal de Perda de Solo* (Wischmeier e Smith, 1978) foi o primeiro e mais importante modelo empírico desenvolvido. Baseado em milhares de dados experimentais reunidos na década de 50, por pesquisadores do *United States Department of Agriculture* (USDA), do *Agricultural Research Service* (ARS), do *Soil Conservation Service* (SCS) e da Universidade de Purdue, o Modelo USLE estima o valor médio da perda de solo, em toneladas por unidade de área, para uma determinada combinação de sistema de cultivo, prática de conservação, tipo de solo, padrão de precipitação e topografia.

Os modelos empíricos são criados a partir de uma base de dados de amostras em condições específicas, e nenhum modelo pode ser considerado verdadeiramente universal. Para ultrapassar a falta de dados de campo para obtenção dessas bases de dados, recorre-se frequentemente a modelos empíricos do tipo SOM's, *Self-Organizing Maps*, que são modelos tipo ANN, *Artificial Neural Network*, baseados numa abordagem que se gere pelo agrupamento e modelação de várias bases de dados, e podem seguir a divisão representada na (Fig. 3):

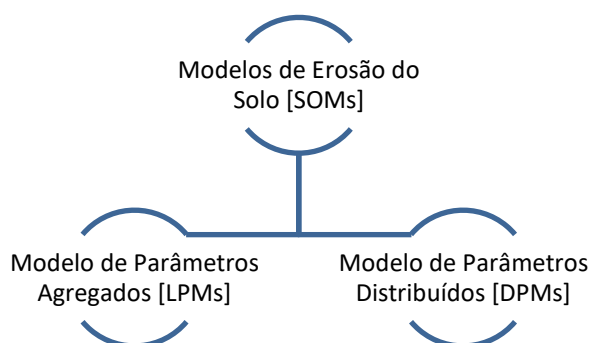


Fig. 3 - Modelos Empíricos utilizados para o cálculo da Erosão Hídrica do solo

Os Modelos de Parâmetros Agregados – *Lumped Parameter Models* ou LPMs - usam técnicas de médias para agrupar as influências de processos espaciais não uniformes de uma determinada área, como a precipitação média da bacia hidrográfica para o cálculo de escoamento. Exemplos destes modelos são os Modelos RUSLE – *Revised Soil Loss Equation* (Renard et al., 1991) e SLEMSA, que estimam a erosão média anual a longo prazo. O SLEMSA, *Soil Loss Estimation Model for Southern Africa* (Elwell e Stocking, 1982), é um modelo semelhante ao USLE, mas adaptado a uma área com registos de dados limitados e onde os fatores são quantificados por métodos mais simples. O fator de práticas de conservação, por exemplo, não é contemplado nesta metodologia, tendo o seu peso sido transferido para outros elementos, como a erodibilidade e o fator topográfico. No final dos anos 70 os impactos das práticas de gestão agrícola e da erosão do solo na qualidade da água e na produtividade do solo tornaram-se uma grande preocupação (Renschler e Harbor, 2002). Isto estimulou o desenvolvimento de uma série de LPMs que incluíam funções para avaliar o efeito de diferentes práticas agrícolas na perda de nutrientes, poluição da água subterrânea e produtividade agrícola (Avwunudiogba e Hudson, 2014), tais como:

- Modelo CREAMS - *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* (Knisel, 1980), é um modelo físico, que permite analisar o escoamento superficial e que se divide em três componentes principais: uma componente hidrológica, uma componente referente aos processos de erosão e sedimentação, que mantém elementos da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), e uma componente química;
- Modelo GLEAMS - *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems* (Knisel e Turtola, 2000), que surgiu na sequência do Modelo CREAMS, enfatizando, porém, os processos na zona de aeração e o carregamento de substâncias químicas para as águas subterrâneas;
- Modelo EPIC - *Environmental Policy Integrated Climate* (Williams et al., 1989), que se trata de um conjunto de modelos matemáticos cujo objetivo passa pela quantificação da relação entre a erosão e a produtividade de culturas. As equações utilizadas são baseadas em componentes físicas, que simulam a erosão e avaliam a sustentabilidade da capacidade produtiva do solo.

Por outro lado, os *Distributed Parameter Models* ou DPMs, Modelos de Parâmetros Distribuídos, levam em consideração a variação natural dos parâmetros e o controlo dos processos de erosão e deposição. São estes os modelos hidrossedimentológicos, desenvolvidos a partir do USLE, e dos quais se destacam:

- Modelo WEPP - *Water Erosion Prediction Project*, (Flanagan et al., 2007), resultado de um esforço multidisciplinar iniciado na década de 1980, é um modelo de base física e contínuo. Baseia-se nos fundamentos das teorias de infiltração, hidráulica e mecânica da erosão, e estima as distribuições espacial e temporal da perda de solo e deposição dos sedimentos. O Modelo WEPP pode ser usado em simulações contínuas ou na opção evento a evento;
- Modelo EUROSEM - *European Soil Erosion Model*, (Morgan et al., 1998), é um modelo que analisa eventos únicos, de forma a estimar a erosão hídrica em parcelas de campo e pequenas sub-bacias. Neste modelo, os processos de erosão, deposição e transporte são processados pela Equação do Balanço de Massa;
- Modelo MEDALUS - *Mediterranean Desertification and Land Use*, (Kirkby, 1988) , projeto que se estendeu de 1991 a 1998. Este projeto, que incluiu instituições e universidades de oito países europeus (Portugal, Espanha, França, Itália, Grécia, Reino Unido, Bélgica e Holanda), surgiu na sequência de um crescente interesse científico pelos problemas ambientais graves que afetavam a Europa Mediterrânea, de que se destacam a erosão e a degradação dos solos;
- Modelo SWAT - *Soil and Water Assessment Tool* (Gassman et al., 2007b), que permite prever o impacto da gestão da água, sedimentos e produtos químicos agrícolas em bacias hidrográficas,

é um modelo de base física, de parâmetros semi-distribuídos, desenvolvido para estimar o efeito das práticas de uso e gestão do solo, a produção de sedimentos, a qualidade da água e a carga de poluentes agrícolas em bacias hidrográficas complexas, a longo prazo. A produção de sedimentos é calculada no SWAT aplicando o Modelo MUSLE.

As escolhas podem assim variar, desde a aplicabilidade de modelos orientados a processos complexos, como o modelo WEPP - *Water Erosion Prediction Project*, até às abordagens empíricas mais simplificadas, como o modelo USLE, é muito selecionado não só pelo seu carácter prático, mas também por fornecer estimativas em grandes escalas espaciais.

Atualmente, o modelo USLE (Wischmeier e Smith, 1978) e a sua revisão (RUSLE) (Renard et al., 1991) são de longe os modelos de previsão de erosão do solo mais aplicados globalmente e, de acordo com (Risse et al., 1993): “O USLE tem sido usado em todo o mundo, para uma variedade de finalidades e em muitas condições diferentes, simplesmente porque parece atender às necessidades correntes, melhor do que qualquer outra ferramenta disponível”.

No presente trabalho, que tem como objetivo aplicar diferentes metodologias para estimar os volumes de sedimentos afluentes a uma albufeira, foram consideradas as seguintes metodologias de cálculo:

- Aplicação do modelo empírico USLE / RUSLE (com recurso a mapas atualizados dos vários fatores intervenientes e a ferramentas SIG) para calcular a perda de solo na bacia e fórmulas empíricas para estimar o designado coeficiente de entrega de sedimentos (ver 2.2.6.);
- Aplicação do modelo de simulação hidrológica HEC-HMS, que inclui também a modelação da componente hidrossedimentológica.

Nos capítulos seguintes são apresentados os principais aspetos destas duas metodologias de cálculo.

## 2.2. MODELO EMPÍRICO USLE / RUSLE

Como mencionado, o Modelo USLE, *Universal Soil Loss Equation* ou EUPS, *Equação Universal de Perda de Solo* (Wischmeier e Smith, 1978) foi desenvolvido inicialmente como uma ferramenta para auxiliar no planeamento do uso de solos agrícolas. Se a perda estimada de solo excedesse os limites aceitáveis, o Modelo USLE seria aplicado para orientação na escolha de uma prática ou práticas que controlariam a erosão de uma forma adequada.

A Equação Universal de Perda de Solo agrupa os numerosos parâmetros físicos e de gestão do uso do solo, que influenciam a taxa de degradação do solo sob seis fatores principais. Trata-se de um modelo projetado para calcular, a longo prazo, perdas médias de solo em condições específicas. A equação é então representada pela seguinte expressão:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

em que  $A$  é a perda de solo calculada por unidade de área e tempo, em  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ;  $R$  é o fator da erosividade das chuvas, em  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ;  $K$  é o fator erodibilidade do solo, em  $t \text{ h}/(\text{MJ mm})$ ;  $L$  é o fator da extensão da inclinação longitudinal, adimensional;  $S$  é o fator de inclinação longitudinal, também adimensional;  $C$  é o fator de gestão de culturas (técnicas de cultivo) ou fator de técnica cultural, adimensional e  $P$  é o fator do método de controlo de erosão ou fator de prática de conservação, adimensional.

Segundo (Wischmeier, 1975) o modelo USLE permite: avaliar a erosão anual do solo, estimando ainda a degradação que resultaria de uma alteração nas colheitas, numa área específica; prever a erosão em áreas com um uso de terreno diferente do agrícola e identificar a necessidade de, numa zona concreta, serem necessárias medidas de conservação; e avaliar a aplicabilidade das práticas de conservação e a sua possível alteração, de forma a proporcionar um cultivo mais intenso, ou ainda servir como guia tanto na seleção e gestão de sistemas de cultivo, como de práticas de preservação de solos.

O modelo USLE foi revisto e atualizado em 1991 (Renard et al., 1991) pela USDA, *United States Department of Agriculture* e pelo *Soil and Water Conservation Service*, tendo resultado o modelo RUSLE – *Revised Universal Soil Loss Equation*, o qual pode ser utilizado em terrenos agrícolas, áreas florestais perturbadas, zonas de pastagem, locais de construção, terras mineradas e recuperadas, campos de treino militar, aterros e outros locais afetos à deposição de resíduos. Esta revisão resultou da necessidade de tornar o modelo mais adaptado à operacionalização por intermédio de computadores pessoais, incorporando, tanto quanto possível, novas informações resultantes de pesquisas entretanto efetuadas. A atualização baseou-se, deste modo, numa extensa revisão do modelo USLE e da sua base de dados, bem como na análise de elementos não anteriormente envolvidos, além da inclusão da teoria que descreve a hidrologia fundamental e os processos de erosão.

Nos pontos seguintes são detalhados cada um dos fatores que fazem parte do modelo USLE /RUSLE.

#### 2.2.1. FATOR DE EROSIVIDADE

Entre os fatores intervenientes no Modelo RUSLE, a erosividade é de especial importância, já que a precipitação é a força motriz da erosão, desempenhando um impacto direto no destacamento e transporte de partículas.

O fator de erosividade (R) avalia a energia das intempéries que estimulam o potencial de erosão existente na zona. Desta forma, o fator R é definido como a soma da média anual do produto da energia cinética,  $E$  da precipitação (decorrente de eventos erosivos) e da intensidade máxima da mesma para um período de 30 minutos,  $I_{30}$ . Trata-se assim de um fator de difícil quantificação, já que deverá incluir para o ano médio os eventos de tempestade meteorológica que se produzem na bacia hidrográfica e avaliar a sua energia erosiva. O fator pode ser obtido através da soma dos valores do índice de erosividade,  $EI_{30}$ , de todos os acontecimentos pluviométricos independentes (separados por períodos de seis ou mais horas sem precipitação) que, num ano, excedam 10 mm de precipitação acumulada. A erosividade de precipitação pode ser então calculada através da expressão:

$$R = \sum EI_{30} \quad (2)$$

em que  $E_c$  corresponde à energia cinética da precipitação, em  $\text{MJ ha}^{-1}$  e  $I_{30}$  à intensidade máxima de precipitação durante 30 minutos para a intempérie, em  $\text{mm h}^{-1}$ .

Para calcular a energia cinética de um acontecimento pluviométrico, a duração deste é subdividida em intervalos de intensidade de precipitação razoavelmente uniforme. Sendo  $h_i$ , a altura de precipitação, expressa em mm, que ocorre no intervalo de tempo genérico,  $i$ , o valor de  $E$  em  $\text{MJ ha}^{-1}$ , pode ser dado por:

$$E = \sum_i (E_c)_i * h_i = \sum_i (E_c)_i * (I_i T_i) \quad (3)$$

em que  $I_i$  é a intensidade de precipitação do acontecimento pluviométrico para o intervalo de tempo  $i$   $\text{mm h}^{-1}$ ,  $T_i$  – período do intervalo  $i$ , em horas e  $E_c$  pode ser determinado da seguinte forma:

$$(E_c)_i = 0,119 + 0,087 \log(I_i), \text{ se } I_i \leq 76 \text{ mm/h} \quad (4)$$

$$(E_c)_i = 0,283, \text{ se } I_i > 76 \text{ mm/h} \quad (5)$$

O cálculo de  $EI_{30}$  exige, pois, o conhecimento da variação temporal da precipitação.

A determinação do valor do fator R, representativo de um dado local, deve basear-se em períodos de vários anos de registos de precipitação. Este processo, que se revela bastante moroso, pode ser simplificado se a erosividade for estimada através de registos de precipitações médias anuais.

Em Portugal foram realizados diversos trabalhos onde foram estabelecidas relações do parâmetro de erosividade da precipitação em função da precipitação anual, para diferentes regiões de Portugal, das quais se apresentam alguns exemplos:

(Agroconsultores, 2001)

$$R \approx 1.35 \times P - 390.6; \text{ para Minho e Douro Litoral} \quad (6)$$

(Agroconsultores, 2003)

$$R \approx 2.23 \times P - 406.3; \text{ para a Zona Interior Centro} \quad (7)$$

(Coutinho e Tomás, 1993)

$$R \approx 3.0 \times P - 550.0; \text{ para o Sul de Portugal} \quad (8)$$

(Coutinho e Tomás, 1993)

$$R \approx 1.35 \times P - 390.6; \text{ para Vale Formoso} \quad (9)$$

onde R é o fator da erosividade das chuvas, em  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e P é a precipitação média anual em mm.

Ao nível da Europa, o *European Soil Data Center* (ESDAC), hospedado no *Joint Research Centre* da Comissão Europeia, que é o centro de dados do solo na Europa, disponibiliza mapas do fator de erosividade da precipitação. Esses mapas, que foram os usados no presente trabalho, são resultado de um estudo realizado a nível europeu (Panagos et al., 2015a), que passou: (1) pela recolha de dados de alta resolução temporal de precipitações, através das instituições responsáveis pela informação meteorológica dos vários países envolvidos; (2) pela determinação do fator R em cada estação de medição de precipitação considerada; e (3) pela normalização e interpolação dos valores de R calculados.

Uma vez que o fator  $R$  fornece o efeito combinado da duração, magnitude e intensidade de cada evento de precipitação, pode ser determinado, como já referido, pelo produto da energia cinética de um evento ( $E_c$ ) e da sua intensidade máxima de 30 minutos ( $I_{30}$ ) (Brown e Foster, 1987):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k \quad (10)$$

$$EI_{30} = I_{30} \sum_{i=1}^0 e_i v_i \quad (11)$$

$$e_i = 0,29 [1 - 0,72 \exp(-0,05)I_i] \quad (12)$$

onde  $R$  é a erosividade média anual ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ),  $n$  é o número de anos abrangidos pelos registos de dados,  $m_j$  é o número de eventos erosivos de um determinado ano  $j$ ,  $EI_{30}$  é o índice de erosividade de um único evento  $k$ ,  $e_i$  é a unidade de energia da precipitação ( $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) e  $v_i$  é o volume de precipitação (mm) durante um período de tempo  $i$ .  $I_{30}$ , por sua vez, representa a intensidade máxima de chuva durante um período de 30 minutos ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e  $I_i$  é a intensidade de precipitação durante o intervalo de tempo selecionado ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Para a determinação do fator de erosividade, o estudo referido pretendeu identificar os eventos de precipitação que contribuíam efetivamente para a erosão (Panagos et al., 2015a). Estes foram selecionados de acordo com os critérios de (Renard et al., 1997) para as seguintes situações: 1º - a) a precipitação cumulativa de um evento é maior do que 12,7 mm; ou b) o evento tem, pelo menos, um pico que excede os 6,35 mm durante um período de 15 min (ou 12,7 mm durante um período de 30 minutos); 2º - Uma acumulação de precipitação inferior a 1,27 mm, durante um período de 6 horas, divide um período longo de tempestade em dois; 3º - O limite de 12,7 mm define eventos de precipitação que têm poder erosivo (Panagos et al., 2015a).

## 2.2.2. FATOR TOPOGRÁFICO

$LS$  é determinado como o fator topográfico, resultante da combinação de  $L$ , fator da extensão da inclinação longitudinal e  $S$ , fator de inclinação longitudinal. Embora seja possível determinar ambos os fatores separadamente, é usual, devido à sua relação, calculá-los de forma conjunta.

(McCool et al., 1989) definem as seguintes expressões para o cálculo dos referidos fatores:

$$L = \left( \frac{x}{22.13} \right)^m \quad (13)$$

$$S = \frac{0.43 + 0.30 \times s + 0.043 \times s^2}{6.613} \quad (14)$$

em que  $x$  é a extensão da encosta, em metros e  $s$  é a inclinação longitudinal em % e  $m$  - expoente do comprimento de encosta - pode ser dado por:

$$\begin{aligned} &0.5, \text{ se } s \geq 5\% \\ &0.4, \text{ se } 3\% < s < 5\% \\ &0.3, \text{ se } 1\% \leq s \leq 3\% \\ &0.2, \text{ se } s < 1\% \end{aligned}$$

Por outro lado, (Foster et al., 1977) referem que o expoente do comprimento de encostas - pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad (15)$$

Em que  $\beta$  é a razão entre a erosão nos sulcos, causada pelo escoamento, e a erosão entre sulcos, originada especialmente pelo impacto das gotas de chuva. Este parâmetro foi definido por (McCool et al., 1989) como:

$$\beta = \frac{(\sin\theta/0.0896)}{[3 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56]} \quad (16)$$

em que  $\theta$  é o declive da encosta, em graus.

Os dois fatores anteriores podem então combinar-se num só índice, denominado fator fisiográfico.

$$LS = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m \times \frac{0.43 + 0.30 \times s + 0.043 \times s^2}{6.613} \quad (17)$$

Para inclinações irregulares, ou seja, combinações de tramos com inclinações negativa e positiva, a expressão para o cálculo do fator LS é a seguinte:

$$LS = \frac{\sum_{j=1}^n (S_j x_j^{m+1} - S_j x_{j-1}^{m+1})}{x_j (22.13)^m} \quad (18)$$

em que  $x_j$  é a distância entre o topo do troço inclinado até ao extremo inferior do  $j$ -ésimo segmento em metros;  $x_{j-1}$  é o comprimento do troço inclinado desde o topo até ao extremo superior do  $j-1$ -ésimo segmento em metros;  $x_e$  é o comprimento total do troço inclinado em metros e  $S_j$  é o valor do fator de inclinação longitudinal para o segmento  $j$ .

A fiabilidade da estimativa da perda de solo vai depender da precisão do cálculo de cada um dos seus parâmetros, especialmente do fator LS. A maior ou menor precisão dos dados topográficos irá ser decisiva na fiabilidade dos valores obtidos para o fator topográfico (Wu et al., 2005). Todavia, as bases

de dados topográficos altamente precisos têm processamento mais demorado, além de normalmente não estarem disponíveis para regiões em grande escala, ou não serem acessíveis por alguma relação de confidencialidade. Uma fonte de elementos, de acesso livre, é o Modelo de Elevação Digital ASTER GDEM, *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM)*, gerado a partir de mapas topográficos ou conjuntos de dados de origem espacial (Remortel et al., 2004).

(Moore e Burch, 1986) descrevem a seguinte expressão para determinação do fator LS, baseando-se na teoria da potência unitária do escoamento, apresentada por Yang em 1972, 1973, e 1984. De acordo com esta teoria, a água na superfície do solo apresenta uma energia capaz de desagregar e transportar as partículas de solo quando estas se deslocam no sentido do declive. O fator topográfico pode ser assim determinado a partir de um modelo de elevação digital, DEM, pela seguinte expressão:

$$LS = \left(\frac{g}{22.13}\right)^{0.4} \times \left(\frac{s}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (19)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade.

Um dos problemas da aplicabilidade do modelo USLE/RUSLE reside na identificação das áreas onde o processo de deposição se sobrepõe à erosão. Isto é fundamental para identificar o início e o fim do comprimento de uma longa encosta. Além disso, foi desenvolvida uma metodologia para definir as áreas de deposição através do ângulo de inclinação limite (*cutoff slope angle*). Ao considerar-se um escoamento, que transporta água e sedimentos, naturalmente este sofrerá uma diminuição de velocidade nalguns pontos, onde a deposição pode ocorrer. Esta deposição dependerá da inclinação do terreno e do próprio escoamento.

De acordo com (Remortel et al., 2001), o fator de inclinação limite é um valor que considera a questão da erosão e deposição, e pode ser definido como a mudança da inclinação de uma secção ao longo do trajeto da direção do escoamento.

No presente trabalho foi usado o mapa do fator topográfico produzido pelo *European Soil Database*, ESDAC para avaliar este fator. A metodologia apresentada por (Panagos, Borrelli e Meusburger, 2015c) para estimar o fator LS, utiliza um Modelo de Elevação Digital de alta resolução a 25 m, aplica o designado algoritmo de Desmet e Govers, e limita a estimativa do parâmetro topográfico a um ângulo de inclinação máximo. O algoritmo de Desmet e Govers emprega o conceito de contribuição da área, contendo na sua formulação o escoamento de drenagem acumulado a montante. Assim, segundo (Desmet e Govers, 1996), os fatores L e S podem ser determinados da seguinte forma:

$$L_{ij} = \frac{\left[(A_{ij} + Dc_{ij}^2)^{m+1} - A_{ij}^{m+1}\right]}{Dc^{m+2} \times (\sin\theta_{ij} + \cos\theta_{ij})^m \times (22.13)^m} \quad (20)$$

$$S_{ij} = 65.41 \times \sin\theta_{ij} + 4.56 \times \cos\theta_{ij} + 0.065 \quad (21)$$

em que os subíndices  $i$  e  $j$  são as coordenadas da célula no mapa da bacia;  $A_{ij}$  corresponde à área de fluxo acumulado (área de contribuição) para cada célula com coordenadas  $(i,j)$ ;  $D_c$  corresponde à resolução das células e  $\theta_{ij}$  à declividade média da vertente.

### 2.2.3. FATOR DE ERODIBILIDADE

K é o fator de erodibilidade (Ton·h)/(MJ·mm), que quantifica a potencial erosão do solo em função da sua composição e presença de material orgânico. Dependente das propriedades físicas do solo, que podem ser intrínsecas ou exogénicas conforme o caso, o fator K é capaz de representar atributos como a estrutura do solo, a permeabilidade e a condutividade hidráulica para determinar o nível de deformação que um solo sofreu ou ainda sofre.

A erodibilidade varia com as texturas do solo, agregados, estabilidade, resistência ao cisalhamento, estruturas do solo, capacidade de infiltração, profundidade e densidade do solo, conteúdo de matéria orgânica e constituintes químicos.

Por observação direta, o fator K permite deduzir a taxa a que um solo pode ser degradado, bem como a extensão da deterioração. Simultaneamente, serve de auxílio a propostas de recuperação e gestão, de forma a evitar perda de solo adicional por quaisquer outros fatores. A medição direta do fator de erodibilidade é, no entanto, cara e demorada, além de apenas se demonstrar viável para alguns dos principais tipos de solo.

A erodibilidade reflete a perda apresentada pelo solo quando os demais fatores que influenciam a erosão permanecem constantes, sendo afetada sobretudo pelas características que condicionam a capacidade do solo em resistir ao destacamento e transporte de partículas.

Originalmente baseado em apenas cinco variáveis, o fator K combinava o teor de areia com silte, o teor em argila, o teor em matéria orgânica, o índice de agregação e o índice de permeabilidade, num nomograma - gráfico que permite obter resultados através da leitura do mesmo ou com a ajuda de construções geométricas simples. Mais tarde, surgiu uma sexta variável, relatando a cobertura de rocha na superfície e (Wischmeier e Smith, 1978), que reduzia o fator de erodibilidade, já que a cobertura oferece uma proteção ao solo face à erosão. O estudo de (Wischmeier e Smith, 1978) forneceu também uma equação para o cálculo do fator de erodibilidade, dispensando a leitura no nomograma, e representada pela seguinte expressão:

$$K = [2,1 \times 10^{-4} \times M^{1.14} \times (12 - a) + 3,25 \times (b - 2) + 0.025 \times (c - 3)] \times 0.1317 \quad (22)$$

$$M = (m_{\text{silt}} + m_{\text{vfs}}) \times (100 - m_c) \quad (23)$$

em que K é o fator de Erodibilidade, em (Ton·h)/(MJ·mm); M é o fator referente à textura;  $m_c$  [%] é o teor de fração de argila (<0,002 mm);  $m_{\text{silt}}$  [%] é o conteúdo da fração de silte (0,002–0,05 mm);  $m_{\text{vfs}}$  [%] é o teor da fração de areia muito fina (0,05–0,1 mm);  $a$  [%] é o conteúdo de matéria orgânica e  $b$  e  $c$  são respetivamente o Código da Estrutura do solo e o Código de Permeabilidade do solo.

O Código de Estrutura do solo pode seguir a classificação original de (Wischmeier e Smith, 1978), ou conforme sugerido nos estudos de (Figueiredo, 1989) para unidades de solo de Trás-os-Montes:

- 1- Agregações muito fina;
- 2- Agregações granulosa e grumosa fina;
- 3- Agregações granulosa e grumosa média e granulosa grosseira;
- 4- Agregações laminoforme, prismoforme, anisoforme e granulosa muito grosseira.

No que diz respeito ao Código de Permeabilidade do solo (Wischmeier e Smith, 1978) sugerem a seguinte classificação:

- 1- Rápida e muito rápida;
- 2- Moderadamente rápida;
- 3- Moderada;
- 4- Moderadamente lenta;
- 5- Lenta;
- 6- Muito lenta.

A equação, no entanto, não faz referência à cobertura de elementos grosseiros à superfície, cuja desconsideração pode sobrestimar o valor obtido para a erodibilidade. (Figueiredo, 2001) desenvolveu a seguinte equação, baseada em (Wischmeier e Smith, 1978):

$$K_{eg} = K_{tf} \times e \times (-0.035 \times \%RC) \quad (24)$$

$$\%RC = 2.51 \times \%EG - 14.46 \quad (25)$$

em que  $K_{eg}$  representa o valor de K corrigido pela presença dos elementos grosseiros à superfície;  $K_{tf}$  é o Fator K (estimado apenas para a terra fina); %EG é a percentagem de cobertura superficial do solo por elementos grosseiros e %RC é a cobertura pedregosa (% área).

Existem ainda outras equações que permitem estimar o fator de erodibilidade e que são geralmente desenvolvidas através de regressões estabelecidas por relações entre o fator medido diretamente no campo e as propriedades do solo (Romkens e Wang, 1987).

A nível europeu, (Panagos et al., 2014) estimaram o fator de erodibilidade do solo com base nalguns atributos do solo, através do nomograma original de Wischmeier (Wischmeier et al., 1971). Uma aproximação algébrica do nomograma inclui cinco parâmetros de solo: textura, matéria orgânica, fragmentos grosseiros, estrutura e permeabilidade e pode ser dada pela (Equação 22).

A (Equação 22) será somente recomendada se o conteúdo de matéria orgânica for conhecido e se o teor da fração de silte for inferior a 70% (Declercq e Poesen, 1992). Além disso, (Gee e Bauder, 1986) dividiram a fração de areia em cinco classes: areia muito fina, fina, média, grossa e muito grossa. A estrutura de areia muito fina (0,05–0,1 mm), referente ao parâmetro  $m_{vfs}$ , geralmente não é objeto de análise sendo, portanto, estimada em 20% por (Gee e Bauder, 1986). Por outro lado, o teor de matéria orgânica é limitado a 4%, de forma a evitar uma subestimação da erodibilidade do solo no caso de solos ricos em matéria orgânica.

Neste estudo, a classe de estrutura de solo (parâmetro b) da Equação 22), foi estimada a partir da *European Soil Database*, como apresentado na (Tabela 1):

Tabela 1 - Classes de estrutura do solo, derivadas do Banco de Dados Europeu de Solos, (Panagos et al., 2014)

| Classe de Estrutura                   | Banco de Dados Europeu de Solos |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 (granular muito fino: 1–2 mm)       | G (bom)                         |
| 2 (granular fino: 2–5 mm)             | N (normal)                      |
| 3 (granular médio ou grosso: 5–10 mm) | P (pobre)                       |
| 4 (bloco ou massivo: > 10 mm)         | H (húmico)                      |

No que toca ao Código de Permeabilidade (parâmetro  $c$ ) da Equação 22), as classes descritas no *U.S. Department of Agriculture's National Soils Handbook No. 430* (USDA, 1983) foram estabelecidas de acordo com as classes de textura do solo (Rawls et al., 1982). Estas classes de textura também se relacionam com valores de condutividade hidráulica saturada, como pode ser visto na (Tabela 2).

Tabela 2 - Classes de permeabilidade do solo e intervalos de condutividade hidráulica saturada, estimadas a partir das principais classes texturais do solo (Panagos et al., 2014)

| Classe de Permeabilidade  | Textura                                                | Condutividade Hidráulica Saturada ( $\text{mm h}^{-1}$ ) |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 (rápida e muito rápida) | Areia                                                  | > 61.0                                                   |
| 2 (moderadamente rápida)  | Solo arenoso franco, solo franco arenoso               | 20.3–61.0                                                |
| 3 (moderada)              | Solo franco, solo franco siltoso                       | 5.1–20.3                                                 |
| 4 (moderadamente lenta)   | Solo franco argiloso<br>siltoso, solo franco argiloso  | 2.0–5.1                                                  |
| 5 (lenta)                 | Solo franco argiloso<br>siltoso, solo argiloso arenoso | 1.0–2.0                                                  |
| 6 (muito lenta)           | Solo argiloso siltoso, solo argiloso                   | < 1.0                                                    |

#### 2.2.4. FATOR DE COBERTURA E PRÁTICAS CULTURAIS

No modelo RUSLE (Renard et al., 1991), o fator  $C$  é constituído por subfatores, nomeadamente relacionados com o impacto do cultivo e gestão do mesmo, com a proteção da superfície do solo pela

cobertura da vegetação e também com a limitação da erosão devido à cobertura superficial. Desta forma, a influência da cultura e das práticas de gestão é incorporada com mais detalhes. Além disso, é possível calcular os valores do fator C para todos os tipos de rotação de culturas e técnicas de cultivo. Por outro lado, são necessários muitos dados de entrada.

Definido como um número adimensional entre zero e um, o parâmetro C representa uma razão ponderada pela erosividade da chuva sob condições específicas para uma determinada vegetação (Wischmeier e Smith, 1978).

Para determinar este fator, é necessário usar parcelas experimentais para estudos de erosão do solo durante o período de precipitação natural, estudos que são caros e demorados (Nearing et al., 2000). Em muitos países, os dados medidos disponíveis a partir de parcelas experimentais são escassos ou inexistentes (Morgan, 2005), razão pela qual vários autores acabaram por usar o fator de cobertura desenvolvido para os Estados Unidos (Wischmeier e Smith, 1978) para mapear a erosão do solo, através de sistemas de informação geográfica (Oliveira et al., 2010).

O estudo do fator de cobertura a nível europeu que foi usado no presente trabalho, (Panagos et al., 2015b) teve por base, um modelo de uso e gestão do solo desenvolvido à escala europeia, cobrindo uma área de 4.381.376 km<sup>2</sup> – o modelo LANDUM. A utilização deste modelo surge com a incorporação da densidade de cobertura vegetal através de dados de sensoriamento remoto de alta resolução espacial, o que revela uma grande vantagem na previsão do fator C, já que a vegetação difere do país para país. Para estimar o fator de cobertura e práticas culturais, o modelo LANDUM diferencia as terras aráveis de todos os outros usos da terra (não aráveis).

- Estimativa do fator C para terras aráveis:

$$C_{ara} = C_{crop,n} \times C_{mant} \quad (26)$$

onde  $C_{ara}$  é o fator C para terras aráveis,  $C_{crop}$  é o fator C com base na composição da cultura de uma área agrícola, e  $C_{mant}$  quantifica a influência das práticas de gestão.

O  $C_{crop,n}$  pode ser estimado através de dados experimentais de estudos anteriores e apresentados na (Tabela 3).

Tabela 3 - Fator  $C_{crop,n}$  para diferentes tipos de cultura, (Panagos et al., 2015b)

| n  | Tipo de Cultura                      | Fator C |
|----|--------------------------------------|---------|
| 1  | Trigo comum                          | 0.20    |
| 2  | Trigo duro                           | 0.20    |
| 3  | Centeio                              | 0.20    |
| 4  | Cevada                               | 0.21    |
| 5  | Milho                                | 0.38    |
| 6  | Arroz                                | 0.15    |
| 7  | Leguminosas secas e proteína vegetal | 0.32    |
| 8  | Batata                               | 0.34    |
| 9  | Beterraba                            | 0.34    |
| 10 | Colza                                | 0.28    |
| 11 | Nabo                                 | 0.30    |
| 12 | Sementes de girassol                 | 0.32    |
| 13 | Linhaça                              | 0.25    |
| 14 | Soja                                 | 0.28    |
| 15 | Algodão                              | 0.50    |
| 16 | Tabaco                               | 0.49    |
| 17 | Alqueive                             | 0.5     |

Já o  $C_{mant}$  pode ser dado pela expressão:

$$C_{mant} = C_{til} \times C_{res} \times C_{cov} \quad (27)$$

que resulta da combinação de efeitos de práticas de cultura -  $C_{til}$ , resíduos de plantas -  $C_{res}$  e cobertura de culturas -  $C_{cov}$ , com valores compreendidos entre 0 e 1.

- Estimativa do fator C para terras não aráveis:

O fator C foi definido para cada classe do CORINE Land Cover de acordo com os valores da literatura (Tabela 4). No entanto, a variedade de valores encontrados na literatura levou à atribuição de uma gama de valores e não a um valor específico.

Tabela 4 - Fator C de acordo com a classe de uso de solo, (Panagos et al., 2015b)

| Grupo                                          | Classe de Uso de Solo | Classe Detalhada                                                                                 | Fator C      |
|------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Culturas Permanentes                           | 221                   | Vinhas                                                                                           | 0.15–0.45    |
|                                                | 222                   | Árvores de fruta e plantações de frutas silvestres                                               | 0.1–0.3      |
|                                                | 223                   | Olivais                                                                                          | 0.1–0.3      |
| Pastagens                                      | 231                   | Pastagens                                                                                        | 0.05–0.15    |
| Áreas agrícolas heterogêneas                   | 241                   | Culturas anuais associadas às culturas permanentes                                               | 0.07–0.35    |
|                                                | 242                   | Padrões de cultivo complexos                                                                     | 0.07–0.2     |
|                                                | 243                   | Terreno utilizado principalmente para agricultura, com áreas significativas de vegetação natural | 0.05–0.2     |
|                                                | 244                   | Áreas agro-florestais                                                                            | 0.03–0.13    |
| Florestas                                      | 311                   | Floresta de folha caduca                                                                         | 0.0001–0.003 |
|                                                | 312                   | Floresta de coníferas                                                                            | 0.0001–0.003 |
|                                                | 313                   | Floresta mistas                                                                                  | 0.0001–0.003 |
| Espécies arbustivas e/ou herbáceas             | 321                   | Pastagens naturais                                                                               | 0.01–0.08    |
|                                                | 322                   | Charnecas                                                                                        | 0.01–0.1     |
|                                                | 323                   | Vegetação esclerófila                                                                            | 0.01–0.1     |
|                                                | 324                   | Arbusto-floresta de transição                                                                    | 0.003–0.05   |
| Espaços abertos com pouca ou nenhuma vegetação | 331                   | Praias, dunas, areias                                                                            | 0            |
|                                                | 332                   | Rochas nuas                                                                                      | 0            |
|                                                | 333                   | Áreas com pouca vegetação                                                                        | 0.1–0.45     |
|                                                | 334                   | Áreas queimadas                                                                                  | 0.1–0.55     |
|                                                | 335                   | Glaciar                                                                                          | 0            |

#### 2.2.5. FATOR DE PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO

Por definição, o fator de prática de conservação, P, no modelo RUSLE refere-se ao quociente entre a perda de solo de um talhão com uma determinada prática agrícola e de um outro talhão, em condições idênticas, lavrado segundo a linha de maior declive. Este parâmetro é capaz de traduzir o efeito das medidas de controlo da erosão através da redução da velocidade do escoamento superficial. As práticas mencionadas afetam assim a erosão, modificando o padrão de escoamento, grau ou direção do escoamento superficial e reduzindo a quantidade e a taxa de fluxo dos sedimentos erodidos (Renard e Foster, 1983).

Para terras cultivadas, as práticas de conservação consideradas incluem o terraceamento, a drenagem subterrânea e a agricultura de contorno – agricultura sustentável, que mantém a fertilidade do solo e aumenta a sua capacidade de retenção de água, garantindo uma melhor qualidade do solo, irrigação e

conservação de água. A agricultura de contorno é uma técnica que implica o cultivo das culturas transversalmente ou perpendicularmente às encostas e paralelamente a curvas de nível, marcadas no terreno como guias. É, portanto, uma agricultura que respeita a elevação do terreno, criando alguns degraus que servirão para o plantio.

Este arranjo de plantação interrompe o escoamento da água e dificulta a erosão do solo. Em terra seca ou áreas de pastagem, práticas de perturbação do solo orientadas pelo contorno da topografia resultam no armazenamento de humidade e redução do escoamento, também utilizadas como práticas de conservação. A prática reduz a erosão do solo encosta abaixo, criando cristas nas linhas de cultivo que atuam como barreiras para o escoamento superficial, reduzindo assim a velocidade do escoamento e aumentando a infiltração nas pequenas depressões formadas. Por outro lado, o terraceamento é uma técnica agrícola aplicada na divisão de uma área inclinada em várias rampas. Com isto, a água das chuvas, ao escoar superficialmente, perde força, removendo menos sedimentos do solo e causando menos impactos sobre este.

De todos os fatores de entrada neste modelo, os valores para o fator de práticas de conservação são considerados os mais incertos (Morgan e Nearing, 2011). O valor do fator P diminui com a adoção das práticas de conservação mencionadas, já que estas contribuem para a redução do volume e da velocidade do escoamento, além de estimularem a deposição de sedimentos ao longo da superfície da encosta, reduzindo consequentemente o potencial de erosão do solo. Os valores típicos variam entre 0,2 para terraceamentos com declive e 1, onde não são aplicadas práticas de controlo de erosão (Wischmeier e Smith, 1978). De facto, quando o declive é relativamente reduzido, grande parte dos sedimentos erodidos das cristas que separam os sulcos, são depositados nos próprios sulcos (Meyer e Harmon, 1985). Pode também antever-se que a erosão e o escoamento concentrado ocorrem especialmente em campos recentemente cultivados.

O fator P, no entanto, não considera práticas de cultivo melhoradas, como o plantio direto e outros sistemas de agricultura de conservação, rotação de culturas, tratamentos de fertilidade e gestão de resíduos, já que estas têm a sua contribuição considerada no fator C.

Os valores atualmente usados no Modelo USLE (Wischmeier e Smith, 1978) para o fator P são quase idênticos aos fatores desenvolvidos nos estudos de perda de solo de (Smith e Whitt, 1947). Para inclinações leves, perto de 0%, Smith e Whitt previram que o fator deveria assumir um valor igual à unidade, pois não é definida nenhuma direção de escoamento. Para encostas íngremes, com declives superiores a 25%, o fator também seria igual a 1, já que uma crista não consegue armazenar água. Os valores variam, assim, para declives intermédios, entre 0 e 1.

No presente trabalho foi considerado o fator de práticas de conservação, cujo mapa de distribuição foi obtido através da *European Soil Data Centre*, estimado com base em dados de observação à escala europeia (Panagos et al., 2015d) e tendo em conta as políticas agroambientais implementadas nos vários Estados-Membros. Esse estudo usou o levantamento estatístico de uso e cobertura do solo do Inventário de Solos LUCAS, *Land Use and Coverage Area frame Survey*, que inclui observações do solo e características da paisagem para mais de 270.000 pontos de observação.

O fator P foi proposto como um produto de 3 subfactores, por (Blanco e Lal, 2008): (a) cultivo/agricultura de contorno, (b) muros de pedra e (c) faixas de proteção:

$$P = P_c \times P_{sw} \times P_{gm} \quad (28)$$

onde  $P_c$  é o subfator de contorno para uma dada inclinação de um campo,  $P_{sw}$  é o subfator de muros de pedra - terraceamento e  $P_{gm}$  é o subfator de faixas de proteção - subfator de cultivo em faixas de proteção.

O modelo MUSLE, versão modificada do modelo RUSLE será abordado no Subcapítulo 2.3.

#### 2.2.6. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Apenas parte do solo erodido alcança a secção de saída da bacia hidrográfica, o restante ficará depositado ao longo do trajeto. Para contabilizar estes processos, é necessário atender à Razão de Entrega de Sedimentos – SDR, *Sediment Delivery Ratio* para uma dada bacia hidrográfica, que permitirá estimar o total de sedimentos transportados para a saída da bacia (Lim et al., 2005).

O coeficiente SDR depende de muitos fatores de carácter geomorfológico e ambiental, tais como, a natureza, extensão e situação das áreas fonte dos sedimentos, a pendente dessas áreas, as características da rede hidrográfica, o coberto vegetal, etc. (Singh e Durgunoglu, 1989). Entre estes fatores, a área da bacia é fator dominante (Walling, 1983).

No presente estudo, para estimar o SDR foram consideradas as seguintes fórmulas empíricas, desenvolvidas por:

- *United States Department of Agriculture*, em 1972 (USDA, 1972)

$$SDR = 0,5656 \times A^{-0.11} \quad (29)$$

- Vanoni, em 1975 (Vanoni, 1975)

$$SDR = 0,4724 \times A^{-0.125} \quad (30)$$

- Boyce, em 1975 (Boyce, 1975)

$$SDR = 0,3750 \times A^{-0.2382} \quad (31)$$

### 2.3. MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA HEC-HMS

Na presente dissertação, a simulação hidrológica foi realizada recorrendo ao programa de cálculo automático HEC-HMS, versão 4.7.1, desenvolvido pelo “*Hydrologic Engineering Center (HEC)* do *United States Army Corps of Engineers*. Este programa dispõe de vários modelos para simular os diferentes processos hidrológicos, nomeadamente, a infiltração e interceção da precipitação, a formação de escoamento superficial, o escoamento base e a propagação do escoamento, e dispõe também de modelos para simular os processos de produção e transporte de sedimentos. Tem a capacidade de realizar simulações de eventos, de dias ou horas, ou simulações contínuas que englobam períodos de cheia e de estiagem ao longo de vários anos.

Nos pontos seguintes são referidos os modelos de cálculo disponíveis no HEC-HMS, destacando-se os métodos usados no modelo definido no presente trabalho.

### 2.3.1. MODELO DE COBERTURA DO SOLO

Parte da precipitação que ocorre na bacia hidrográfica pode ser interceptada pela vegetação e ficar aderente à folhagem e aos caules, ou ainda armazenada nas ramificações dos mesmos. Interceptada, esta fração da precipitação sofrerá evaporação ou evapotranspiração, não contribuindo para o escoamento superficial.

Com a interceptação e retenção das gotas da chuva nas copas das árvores, as florestas são capazes de regular a precipitação, mitigando os processos de erosão do solo e os efeitos negativos relacionados com eventos de chuva intensa, como as cheias.

A cobertura do solo é assim tratada pelo HEC-HMS, como uma das componentes que é capaz de representar a presença de plantas e árvores na superfície das bacias. A vegetação intercepta a precipitação, reduzindo então a quantidade de gotas de água que chegam à superfície do solo. O programa considera assim que a água interceptada evapora entre os eventos de tempestade. Além disso, como mencionado, as plantas também extraem água do solo no processo de transpiração, fenómeno que pode ser combinado com a evaporação, constituindo a evapotranspiração. Apesar da combinação ser, em termos de cálculo, opcional, o programa recomenda a sua utilização para simulações contínuas.

Existem três métodos de modelação da cobertura do solo disponíveis no HEC-HMS, o *Dynamic Canopy*, o *Gridded Simple Canopy* e o *Simple Canopy*. O Método *Simple Canopy* é o método mais aplicado, já que como o próprio nome indica, é simples na sua utilização e parametrização. O *Simple Canopy* considera que toda a precipitação é interceptada até que a capacidade de armazenamento da cobertura seja preenchida. O Método *Gridded Simple Canopy* implementa o Método *Simple Canopy* numa malha quadrangular regular. Já o *Dynamic Canopy* inclui a capacidade de variar fatores ao longo do tempo para drásticas mudanças da cobertura vegetal numa região.

Tendo em conta que, no presente trabalho, o modelo HEC-HMS vai ser usado para realizar uma simulação contínua ao longo de vários anos, foi selecionado o Método de Cobertura Simples, *Simple Canopy Method*.

### 2.3.2. MODELO DE SUPERFÍCIE

Este modelo destina-se a representar a superfície do solo onde a água pode se acumular no armazenamento em depressões. O armazenamento em depressões de uma superfície impermeável, como parques de estacionamento, é geralmente próximo de zero. No entanto, o armazenamento em depressões num campo agrícola pode ser muito significativo, conforme as práticas de cultura em vigor. Nestes casos, a água acumula-se na depressão e infiltra-se de acordo com a capacidade que o solo possui em aceitar água, iniciando-se o escoamento superficial quando a taxa de precipitação excede a taxa de infiltração e quando a capacidade de armazenamento da depressão da superfície se esgota. A precipitação que fica armazenada na depressão da superfície, pode infiltrar-se após a interrupção da precipitação e está sujeita a evapotranspiração potencial. A seleção de um modelo de superfície é opcional e geralmente é utilizada apenas para aplicações de simulação contínua.

Ao utilizar um método de superfície no HEC-HMS, o escoamento superficial não se iniciará até que a taxa de precipitação exceda a capacidade de infiltração do solo e o armazenamento em depressões seja preenchido. Existem dois métodos de modelação da superfície disponíveis no HEC-HMS, o *Gridded Simple Surface* e o *Simple Surface*. O Método *Simple Surface* é o método de superfície mais utilizado no HEC-HMS, já que é de fácil aplicação. Conceitualmente, o Método *Simple Surface* admite que toda precipitação é capturada e armazenada na superfície até que o armazenamento disponível seja preenchido. Quando o armazenamento estiver preenchido, e mesmo durante o seu enchimento, a água

infiltrar-se-á nas camadas de solo. O Método *Gridded Simple Surface* implementa o Método *Simple Surface* numa malha quadrangular regular.

No presente trabalho o método de superfície selecionado foi o Método de Superfície Simples, *Simple Surface Method*.

### 2.3.3. MODELO DE PERDAS

Um elemento essencial para a simulação do processo precipitação-escoamento é a determinação da fração de precipitação que de facto contribui para o escoamento superficial – precipitação útil. A diferença entre a precipitação total que cai sobre a bacia hidrográfica e a precipitação útil é definida como sendo as perdas.

Os valores das perdas são influenciados por diversos fatores, como as características da precipitação, nomeadamente o volume de precipitação, duração e intensidade; atributos da bacia hidrográfica, como a vegetação dominante; ou ainda aspetos topográficos, como o declive; e o teor de humidade do solo.

O HEC-HMS disponibiliza um total de nove métodos diferentes para estimar os valores das perdas, sendo alguns desses métodos mais adequados à simulação de eventos, enquanto outros são especialmente destinados à simulação contínua. A (Tabela 5) informa os métodos disponíveis, bem como a sua adequação a cada um dos tipos de simulação:

Tabela 5 - Métodos de Perdas para eventos e simulações contínuas

|                                         | Evento | Simulação Contínua |
|-----------------------------------------|--------|--------------------|
| <i>Deficit and Constant</i>             |        | x                  |
| <i>Exponential</i>                      | x      |                    |
| <i>Green and Ampt</i>                   | x      |                    |
| <i>Gridded Deficit and Constant</i>     |        | x                  |
| <i>Gridded Green and Ampt</i>           | x      |                    |
| <i>Gridded SCS Curve Number</i>         | x      |                    |
| <i>Gridded Soil Moisture Accounting</i> |        | x                  |
| <i>Initial and Constant</i>             | x      |                    |
| <i>Layered Green and Ampt</i>           |        | x                  |
| <i>SCS Curve Number</i>                 | x      |                    |
| <i>Smith Parlange</i>                   | x      |                    |
| <i>Soil Moisture Accounting</i>         |        | x                  |

Tendo em conta que no presente trabalho se pretende realizar uma simulação contínua, o método de perdas selecionado foi o *Deficit and Constant Method*. Este método usa apenas uma única camada de solo para contabilizar as mudanças contínuas no teor de humidade. O conceito subjacente deste modelo é que a taxa potencial máxima de perda de precipitação,  $f_c$ , é constante ao longo de um evento e inclui

uma perda inicial,  $I_a$  que reflete a retenção de água à superfície e a intercepção pela vegetação. Assim, a precipitação útil,  $p_{et}$ , é definida pela equação:

$$p_{et} = \begin{cases} 0, & \text{se } \sum p_i < I_a \\ p_t - f_c, & \text{se } \sum p_i > I_a \text{ e } p_t > f_c \\ 0, & \text{se } \sum p_i > I_a \text{ e } p_t < f_c \end{cases}$$

Com  $p_t$  a representar uma precipitação média durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $p_i$  são os dados observados ao tempo  $t_i$  e  $\sum p_i$  é a precipitação total observada durante o período do evento considerado.

O *Déficit and Constant Loss* define, assim, que existe um volume de perdas iniciais que deve ser satisfeito, correspondente à quantidade de precipitação necessária para iniciar o escoamento superficial, e que qualquer precipitação adicional será perdida a uma taxa constante. Da mesma forma, qualquer precipitação que não seja infiltrada tornar-se-á precipitação útil. Este método é adequado a simulações contínuas pela contabilização do défice de humidade da sub-bacia, o que requer dados relativos à evapotranspiração e ao défice máximo de humidade. A evapotranspiração aumenta este défice durante períodos sem precipitação, ou seja, atua secando o solo. A água armazenada superficialmente infiltra-se na camada do solo e a taxa de infiltração é determinada pela capacidade da camada do solo em aceitar água. A infiltração inicia-se a uma taxa inicialmente alta e diminui exponencialmente até um limite assintótico – correspondente à condutividade hidráulica saturada, conforme se pode verificar na (Fig. 4).

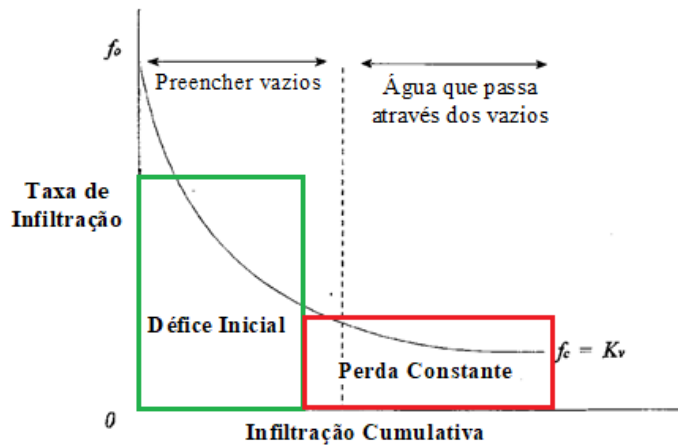


Fig. 4 - Taxa de Infiltração, (USACE, 2021)

De acordo com a (Fig. 4), o retângulo com contorno verde corresponde ao volume de perdas inicial e o retângulo com contorno vermelho à taxa de perda constante. Como tal, serão superestimadas e subestimadas taxas de infiltração em determinados momentos, de forma a fornecer um bom ajuste em toda a janela do tempo de simulação.

#### 2.3.4. MODELO DE TRANSFORMAÇÃO PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO

Quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração no solo, a água começa a acumular na superfície do solo e nas depressões do terreno, passando a fluir pela encosta como escoamento superficial.

O HEC-HMS disponibiliza um total de nove métodos de transformação precipitação-escoamento diferentes: *Clark Unit Hydrograph Transform*, *Kinematic Wave Transform*, *ModClark Transform*, *SCS Unit Hydrograph Transform* e *Snyder Unit Hydrograph Transform*.

No presente trabalho o método de transformação selecionado foi o Método *Kinematic Wave Transform* – Onda Cinemática.

Os métodos de onda cinemática são usados extensivamente para estudos de propagação de escoamento superficial no sistema de modelação precipitação-escoamento. Este método considera cada sub-bacia como um sistema formado por duas componentes fundamentais: superfícies de escoamento e canais coletores. As superfícies de escoamento são assimiladas a canais planos definidos pelo comprimento, inclinação e coeficiente de rugosidade, enquanto os canais coletores são caracterizados pelo comprimento, secção transversal, inclinação e coeficiente de rugosidade.

O método de onda cinemática é usualmente selecionado, já que se trata de um procedimento com simplificações matemáticas, que tornam o modelo mais eficiente para a representação do sistema real. A mecânica do escoamento de canal aberto instável pode ser expressa matematicamente pelas equações de Saint-Venant, desenvolvidas em 1871, que exprimem princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento.

Considerando um volume de controlo - espaço delimitado pela superfície da água - a superfície do limite do canal e duas secções transversais separadas por uma pequena distância,  $\Delta x$ , de acordo com o representado (Fig.5).

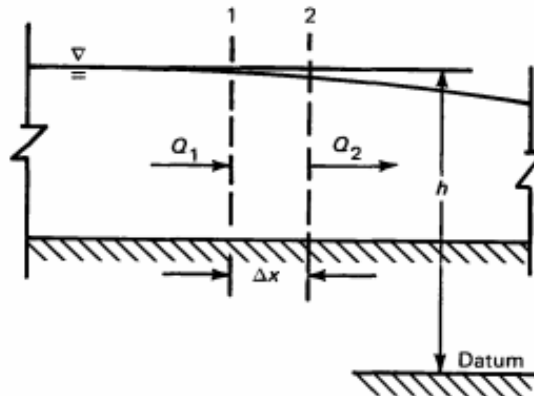


Fig. 5 - Equação de continuidade, (Miller, 1984)

$$Q_2 - Q_1 = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \quad (32)$$

O segundo membro da equação será positivo quando o volume diminui. Esta alteração de volume ocorrerá a uma taxa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} (B \Delta x) \quad (33)$$

Assim, a equação de continuidade poderá ser expressa por:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial h}{\partial t} (B \Delta x) = 0 \rightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \rightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (34)$$

em que  $A$  é a área da secção transversal de escoamento;  $B$  é a largura superficial da secção transversal;  $h$  é a altura de escoamento;  $Q$  é o caudal que atravessa a secção transversal;  $t$  é o tempo e  $x$  é a distância horizontal (Miller, 1984).

No caso de um canal prismático ou retangular, poderá reduzir-se à forma simplificada:

$$A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (35)$$

em que  $v$  é a velocidade do escoamento e  $y$  é a profundidade do escoamento vertical (Miller, 1984).

Por sua vez, os princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento, quando aplicados ao escoamento de água com superfície livre em canais com fundo fixo e impermeável, onde se possa admitir que:

- O escoamento ocorre essencialmente na direção longitudinal;
- A superfície livre na secção transversal é horizontal;
- A velocidade do escoamento na secção transversal tem uma distribuição uniforme;
- A aceleração da direção vertical é desprezável;
- A distribuição da pressão é hidrostática;
- O declive do fundo do canal é pequeno ( $\tan \theta \cong \sin \theta$  e  $\cos \theta \cong 1$ );
- A curvatura das linhas de corrente é pequena;
- O atrito com as paredes do canal pode ser representado pelas fórmulas de resistência do regime permanente.

conduzindo às seguintes expressões:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = Bp \quad (36)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} + g \times E1 \right) = -g \times A \times S_f + g \times E2 \quad (37)$$

em que  $p$  é a intensidade de precipitação sobre a superfície livre;  $E1$  é o momento estático da secção transversal em relação à superfície livre;  $E2$  é a derivada parcial do momento estático  $E1$ ;  $S_f$  é a perda de carga unitária e  $g$  é a aceleração da gravidade (Hipólito e Vaz, 2017).

Expressão que pode também ser escrita:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \times A \times \frac{\partial h}{\partial x} + g \times A \times (S_f - S_0) = 0 \quad (38)$$

em que  $S_0$  é o declive do fundo do canal.

Por sua vez, a perda de carga unitária,  $S_f$  pode ser determinada por fórmulas empíricas de Manning-Strickler e Chézy:

$$S_f = \frac{Q \times |Q|}{Kt^2} \quad (39)$$

onde  $Kt$  é a capacidade de transporte da secção transversal, que pode ser dada por:

- Manning-Strickler:

$$Kt = KS \times A \times R^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{n} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \quad (40)$$

em que  $KS$  é o coeficiente de Strickler e  $n$  é o coeficiente de Manning.

- ou Chézy:

$$Kt = Ch \times A \times R^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

em que  $Ch$  é o coeficiente de Chézy.

Por outro lado, a equação de movimento com termos da equação de Chézy, que traduz o escoamento uniforme, pode ser dada por (Henderson, 1966):

$$S_f = \frac{v^2}{C^2 R} = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (42)$$

com:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (43)$$

Assim sendo, são apenas considerados os efeitos de atrito que se desenvolvem entre as paredes do canal e o fluído, bem como os efeitos da declividade do fundo.

A aproximação da onda cinemática tem em conta que a onda cinemática ocorre quando os termos dinâmicos nas equações de quantidade de movimento se tornam insignificantes, ou seja, desconsidera

as forças que dão origem ao movimento. Tal permite supor que a inclinação do fundo do canal é aproximadamente igual à inclinação de atrito, fazendo com que a linha de energia seja paralela ao fundo do canal:

$$S_0 = S_f \quad (44)$$

Considerando assim, que se trata de um escoamento uniforme, é possível definir a seguinte equação de quantidade de movimento:

$$A = \alpha \times Q^b \quad (45)$$

em que  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes determinados para cada secção transversal do canal por uma fórmula de Chézy.

### 2.3.5. MODELO DE ESCOAMENTO BASE

O escoamento base provém do esgotamento das reservas subterrâneas, dependendo do armazenamento disponível nestas reservas que, por sua vez, depende das condições antecedentes à ocorrência de precipitação e das características morfológicas, fisiográficas, geológicas e geotécnicas da bacia hidrográfica, que favorecem ou determinam a alimentação subterrânea e a própria existência de reservas subterrâneas (Portela, 2006).

Muitos fatores influenciam a quantidade do escoamento base, como a geomorfologia fluvial, o solo, o uso do solo e as condições climáticas. As mudanças no uso de solo têm uma contribuição significativa na afetação do escoamento base, sobretudo as modificações na área florestal, que se correlacionam com alterações nos processos de evapotranspiração, infiltração e preenchimento dos depósitos de água subterrânea numa bacia hidrográfica.

O HEC-HMS inclui quatro modelos alternativos para o cálculo do escoamento base: o *Bounded Recession Baseflow*, *Constant Monthly Baseflow*, *Linear Reservoir Baseflow*, *Nonlinear Boussinesq Baseflow* e o *Recession Baseflow*.

O *Recession Baseflow* é um método projetado para aproximar o comportamento típico observado nas bacias hidrográficas, quando o escoamento no canal recua exponencialmente após um evento. Este método destina-se principalmente à simulação de eventos. O *Bounded Recession Baseflow* é um método de recessão limitada, destinado a operações de previsão em tempo real. O método é muito semelhante ao *Recession Baseflow* e, como ele, não considera a conservação de massa na sub-bacia. A principal diferença reside no facto de que os limites de escoamento base mensais podem ser especificados no *Bounded Recession Baseflow*. Por outro lado, o *Linear Reservoir Baseflow* como o próprio nome indica, usa um reservatório linear para modelar a recessão do escoamento base após um evento de tempestade. É o único método de escoamento base que considera a conservação de massa dentro da sub-bacia. Já o *Nonlinear Boussinesq Baseflow* é projetado para aproximar o comportamento típico observado em bacias hidrográficas quando o escoamento no canal diminui após um evento. É semelhante ao *Recession Baseflow*, mas assume uma camada de água subterrânea não confinada e invoca os pressupostos de

Boussinesq. Por fim, o *Constant Monthly Baseflow* permite a especificação de um escoamento base constante para cada mês do ano e destina-se principalmente à simulação contínua em sub-bacias.

Tendo em conta que no presente trabalho será realizada uma simulação contínua, o método de escoamento base selecionado foi o Método *Constant Monthly Baseflow*.

#### 2.3.6. MODELO DE PROPAGAÇÃO

Os modelos de propagação permitem estimar as variações temporais e espaciais do escoamento, à medida que este percorre um rio ou canal. Estes modelos podem ser de dois tipos: os hidrológicos e os hidráulicos. O modelo de propagação do tipo hidrológico emprega a equação de continuidade, com uma relação curvilínea ou linear entre o armazenamento e a descarga que ocorrem num rio. O modelo de propagação hidráulico, por outro lado, usa tanto a equação de continuidade quanto a equação de quantidade de movimento (Viessman e Lewis, 2005).

Desta forma, a modelação de escoamento em rios ou canais pode ser dada pelas equações de continuidade e quantidade de movimento de Saint Venant:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (46)$$

onde  $q$  é a descarga por unidade de comprimento e os restantes parâmetros foram já definidos anteriormente (Tucci, 1998). A equação admite uma função contínua das variáveis ao longo do trecho. Ao desprezar a variação espacial da área, definir  $I_t$  como o hidrograma de entrada,  $Q_t$  como o hidrograma de saída,  $Q_l$  como contribuição lateral do trecho ( $q \, dx$ ) e o armazenamento do trecho como  $St = A \, dx$ , gera-se a equação de continuidade concentrada:

$$\frac{dSt}{dt} = I_t - Q_t + Q_l \quad (47)$$

Através da variação da quantidade de movimento e das forças atuantes num volume de controlo, pode chegar-se à seguinte equação dinâmica:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial y}{\partial x} = g A S_0 - g A S_f \quad (48)$$

As equações são também conhecidas como as equações do escoamento unidimensional não-permanente gradualmente variado (Tucci, 1998).

O modelo de propagação hidrológico utiliza a equação da continuidade, cuja forma mais simplificada dita que o caudal afluente é igual à soma do caudal efluente com as variações de volume de armazenamento:

$$I = O + \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (49)$$

em que  $I$  é a média afluente durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $O$  é a média efluente durante  $\Delta t$  e  $S$  é a água existente na linha de água – correspondente ao armazenamento na mesma. Os modelos hidrológicos precisarão de estimar os seus parâmetros através de dados registados nas secções de montante e jusante dos rios e/ou através de técnicas de otimização robustas para resolver a conservação unidimensional da massa e a equação de continuidade de armazenamento (Barati, 2011).

O HEC-HMS tem disponível nove métodos de propagação hidrológica e equações de escoamento variado. São eles, a *Kinematic Wave Routing*, *Lag Routing*, *Lag and K Routing*, *Modified Puls Routing*, *Muskingum Routing*, *Muskingum-Cunge Routing*, *Normal Depth Routing*, *Straddle Stagger Routing*. Cada método fornece um nível diferente de detalhe e nem todos os métodos são igualmente adequados para representar um determinado fluxo.

O Método seleccionado para o Modelo de Propagação foi o *Muskingum-Cunge Routing*.

Desenvolvido por (McCarthy, 1938), o Método de *Muskingum-Cunge* é um método de propagação de escoamento concentrado e surge como uma alternativa apelativa pela simplicidade de dados que são requeridos.

A propagação é baseada numa relação linear entre o armazenamento de um canal e a descarga de entrada e saída, que será consequentemente responsável pelo prisma e cunha de armazenamento. O armazenamento correspondente a uma linha paralela ao leito do rio é chamado de armazenamento de prisma e a água localizada entre esta linha e a linha de superfície do perfil real é o armazenamento em cunha.

No método de *Muskingum*, o armazenamento  $S$  é um volume de água num trecho do curso de água, que pode ser aproximado por uma função do caudal que sai desse volume,  $O$ , e do caudal que entra no mesmo,  $I$ :

$$S = KO + KX(I - O) = K[O + X(I - O)] = K(XI + O - XO) = K[XI + (1 - X)O] \quad (50)$$

Tal corresponde ao volume armazenado dividido em duas parcelas, uma correspondente ao armazenamento prismático e outra ao armazenamento em cunha (Fig. 6). Quando o caudal que entra é igual ao que sai, o volume armazenado é aproximado a  $KO$ , em que  $K$  é o tempo de propagação entre a secção de entrada e a secção de saída. De contrário, quando o caudal que entra não é igual ao que sai, esse volume é adicionado de uma parcela (proporcional à diferença entre os dois caudais, através de um fator  $KX$ , sendo  $X$  adiante definido). Esta parcela será positiva quando o caudal que entra é maior do que aquele que sai, e negativa quando o contrário acontece. A parcela  $KO$  corresponde à parcela do armazenamento em prisma, e a parcela  $KX(I - O)$ , ao armazenamento em cunha (Hipólito e Vaz, 2017).

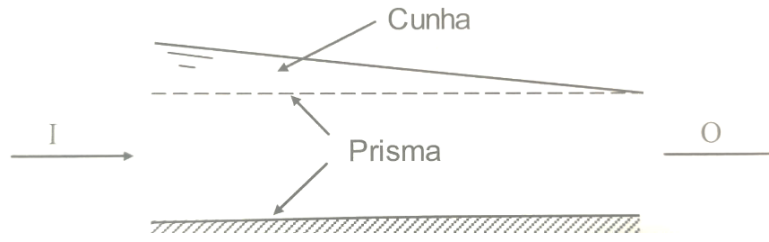


Fig. 6 - Volume armazenado num trecho de água (Hipólito e Vaz, 2017)

A (Equação 50) juntamente com a discretização da equação de continuidade origina a seguinte expressão:

$$\frac{S2 - S1}{\Delta t} = \frac{I1 + I2}{2} + \frac{O1 + O2}{2} \quad (51)$$

onde os índices 1 e 2 se referem aos instantes inicial e final de um intervalo de tempo, conduzindo a:

$$O2 = C0 \times I1 + C1 \times I2 + C2 \times O1 \quad (52)$$

em que o parâmetro  $C$ , subdividido em coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$ , é o número de Courant, que se deve procurar que seja aproximadamente unitário.

com:

$$C0 = \frac{X + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{K}}{(1 - X) + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{K}} \quad (53)$$

$$C1 = \frac{\frac{1}{2} \frac{\Delta t}{K} - X}{(1 - X) + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{K}} \quad (54)$$

$$C2 = \frac{(1 - X) - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{K}}{(1 - X) + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{K}} \quad (55)$$

Este é assim designado de modelo de *Muskingum* (Hipólito e Vaz, 2017). Já o modelo de *Muskingum-Cunge* utiliza ainda os coeficientes de difusão numérica  $\mu_h$  e  $\mu_n$  para determinar o valor de  $X$ :

$$\mu h = \begin{cases} \frac{Q}{2 B S_f}, & \text{onda difusa} \\ 0, & \text{onda cinemática} \end{cases} \quad (56)$$

$$\mu n = c \times \Delta x \times \left( \frac{1}{2} - X \right) \quad (57)$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{B \times S_f \times c \times \Delta x} \right) \quad (58)$$

$$c = \frac{dQ}{dA} ; K = \frac{\Delta x}{c} \quad (59)$$

em que  $c$  é a celeridade em m/s.

Além disso, deve ter-se presente que o valor de  $X$  deve estar dentro do intervalo  $[0;0,5]$ , para que o coeficiente de difusão numérica seja positivo ou nulo.

O método de propagação *Muskingum-Cunge* baseia-se, portanto, na combinação da conservação da massa com a conservação da quantidade de movimento. Por vezes, é referido como um método de coeficiente variável, porque os parâmetros de propagação são recalculados a cada intervalo de tempo, com base nas propriedades do canal e na profundidade do escoamento. Representa, de igual forma, a atenuação das ondas de cheia e pode ser utilizado em trechos com pequenas inclinações, o que é adequado ao caso da bacia hidrográfica do Tâmega.

#### 2.3.7. MODELO DE EROÇÃO

Os métodos para estimar a erosão nas sub-bacias disponíveis no programa HEC\_HMS são: *Build-up Wash-off*, *Modified USLE*, *LA Debris Method EQ1*, *LA Debris Method EQ 2-5*, *Multi-Sequence Debris Prediction Method (MSDPM)*, *USGS Long-Term Debris Model*, *USGS Emergency Assessment Debris Model*.

Para o presente trabalho foi selecionado o *Modified MUSLE*.

Este método surgiu em 1975, proposto por J.R. Williams. A equação original do modelo USLE (ver Subcapítulo 2.2.) baseava-se na intensidade da precipitação e, consequentemente, não fazia diferenciação entre intempéries associadas a baixa ou alta infiltração do solo. Com alta infiltração, naturalmente, existiria pouco escoamento superficial e pouca erosão associada. Por outro lado, eventos de baixa infiltração teriam relativamente mais escoamento superficial e, certamente, conduziriam a mais erosão. As modificações na equação USLE original refletiram-se, desta forma, na mudança da formulação do escoamento superficial. O fator de erosividade da chuva ( $R$ ) no modelo USLE foi então substituído por um fator de energia de escoamento ( $Rm$ ). Este foi projetado e validado através de dados de 18 bacias hidrográficas com áreas até aproximadamente 1620 hectares (Williams, 1975). Foi argumentado por (Williams e Berndt, 1977) que esta reformulação produziria uma estimativa mais precisa da perda de solo porque as características da bacia hidrográfica influenciavam as taxas de escoamento e o rendimento de sedimentos de maneira semelhante. Assim, o Modelo MUSLE passa a calcular a produção de sedimentos de um segmento de terra permeável com base na seguinte equação:

$$S_{ed} = a (Q_{surf} \times q_{peak})^b \times K \times LS \times C \times P \quad (60)$$

em que  $S_{ed}$  é a perda de solo num determinado evento (toneladas);  $a$  e  $b$  são coeficientes de ajuste (adimensionais);  $Q_{surf}$  é o volume de escoamento superficial do evento ( $m^3$ );  $q_{peak}$  é o caudal de pico do evento ( $m^3 s^{-1}$ ); e os restantes fatores mantêm-se do Modelo USLE original.

Os coeficientes da (Equação 60) podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias. No Sistema Internacional são  $a = 11,8$  e  $b = 0,56$  (Williams, 1975). Já  $Q_{surf}$  e  $q_{peak}$  podem ser estimados através de modelos precipitação-escoamento, em que as variáveis são o volume de precipitação pluvial do evento ( $P$ ) em mm, o número de escoamento ( $CN$ ) e a área da bacia ( $A$ ) em ha, dados pelas seguintes equações de (Chow et al., 1988):

$$Q_{surf} = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{(P + 0.8 \times S)}, se (P - 0.2 \times S \geq 0) \quad (61)$$

em que:  $S_{es} = \frac{25.400}{CN} - 25$ , (mm), é um parâmetro que corresponde ao potencial de infiltração máximo após o início do escoamento superficial.

Já o caudal de pico,  $q_{peak}$ , pode ser calculado pela seguinte equação de (Schwab et al., 1981):

$$q_{peak} = 0.0021 \times V_{es} \times A / T_p \quad (62)$$

em que  $V_{es}$  (mm) é o volume de escoamento superficial;  $A$  (ha) é a área da bacia; e  $T_p$  (h) é o tempo de pico do hidrograma.

Os restantes parâmetros correspondem aos fatores de erodibilidade do solo ( $K$ ), topográfico ( $LS$ ), de cobertura do solo ( $C$ ) e de práticas de conservação ( $P$ ), já anteriormente abordados (ver Subcapítulo 2.2.). Os correspondentes valores típicos são:  $K$  varia entre 0,05 para areia argilosa não consolidada a 0,75 para solos argilosos;  $LS$  varia entre 0,1 para as encostas curtas e planas e 10 para as encostas longas ou íngremes;  $C$  varia entre 1,0 para solos descobertos a 0,1 para solos totalmente cobertos, podendo ainda alcançar os 0,0001 para solos de floresta sob densas copas de árvores (USACE, 2015).

#### 2.3.8. MODELO DE SEDIMENTAÇÃO

Os processos relacionados com os sedimentos contidos na linha de água estão diretamente ligados à capacidade do escoamento de transportar o material erodido. Esta capacidade pode depender tanto do escoamento como das propriedades dos sedimentos. Se o rio conseguir transportar mais sedimentos do que aqueles contidos no fluxo de entrada, então outros adicionais poder-se-ão juntar à corrente, na sequência da erosão do leito do rio. No entanto, se o escoamento na linha de água não puder transportar os sedimentos do fluxo de entrada, estes depositar-se-ão. Esta deposição, no entanto, demora tempo. Para saber quanto tempo será necessário, para que os sedimentos que excedem a capacidade de transporte depositem, poderá ser necessária a análise da velocidade de queda.

Porém, é importante ter em mente que, mesmo que a linha de água possua uma capacidade de transporte capaz de acelerar a erosão do leito do rio, existe uma limitação desse fenómeno.

Além disso, deverá ser tido em conta que o leito do rio é representado como um modelo de duas camadas. A abordagem da “camada ativa” divide uma cama de sedimentos hipotética em duas camadas, a ativa e a inativa (Fig. 7). A camada superior representa o topo do leito do rio, que interage ativamente com o escoamento e que responde mais rapidamente a possíveis variações do escoamento. Já a camada inferior, inativa, corresponde à camada de leito subjacente. Inicialmente, os sedimentos são removidos ou adicionados à camada ativa. Durante cada etapa de tempo, a composição desta camada é avaliada com base nos processos de erosão e deposição, de acordo com o  $d_{90}$  da granulometria da camada ativa e com os sedimentos da camada inativa. O modelo de duas camadas também é capaz de representar uma condição de “blindagem”, que reduz a taxa de erosão à medida que a camada superior fica mais grossa.

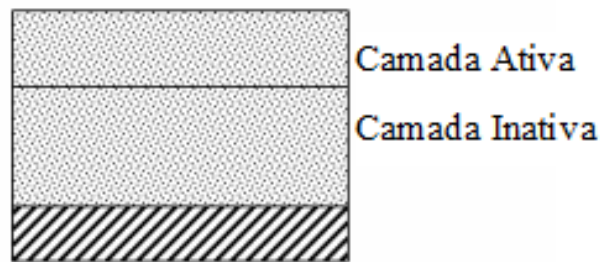


Fig. 7 - Esquema do Modelo de duas camadas, adaptado de (Pak et al., 2008)

O HEC-HMS apresenta quatro opções para o cálculo, que inclui: *Fisher's Dispersion*, *Linear Reservoir*, *Uniform Equilibrium* e *Volume Ratio*.

O Método selecionado no presente trabalho para o Modelo de Sedimentação foi o *Volume Ratio*.

O método de *Volume Ratio* vincula o transporte de sedimentos ao transporte do escoamento na linha de água, através de uma abordagem concetual. Para cada intervalo de tempo, os sedimentos dos elementos a montante são adicionados aos sedimentos já presentes na linha de água, sendo os processos de erosão e deposição calculados então para cada classe granulométrica.

A proporção de sedimentos que sai do trecho em cada intervalo de tempo é considerada igual à proporção do escoamento que sai do trecho durante esse mesmo intervalo. Tal significa, que todos os sedimentos, independentemente da classe, são transportados pela linha de água à mesma taxa. Este método é muito semelhante à abordagem usada no modelo da *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT (Gassman et al., 2007a), mencionado no Subcapítulo 2.1.

#### 2.3.9. MODELO DE POTENCIAL DE TRANSPORTE

No HEC-HMS, o modelo do potencial de transporte especifica a forma como a capacidade de transporte de sedimentos do fluxo da linha de água será calculada para sedimentos não coesos. Foram propostos muitos métodos para calcular o potencial de transporte neste modelo de simulação. Cada método é desenvolvido para uma distribuição de tamanho de grão de sedimentos e condições ambientais particulares. O mesmo método de potencial de transporte será usado em toda a linha de água dentro do modelo de bacia.

As funções de potencial de transporte para calcular a quantidade de sedimentos que pode ser transportada pela corrente pode ser do tipo coeso – (Krone, 1962) ou não coeso – com (Engelund e

Hansen, 1967), (White e Ackers, 1973) e (Yang, 1984) a remeterem-se à potência de fluxo (SP); (Laursen, 1958), (Meyer-Peter e Müller, 1948) e (Wilcock e Crowe, 2003) a seguir o método de cisalhamento excessivo (ES) e (Toffaletti, 1968) como o único modelo de regressão.

O Método selecionado para o Modelo de Potencial de Transporte foi o Método de *Ackers and White*.

(White e Ackers, 1973) aplicaram a análise dimensional, usando argumentos físicos para expressar a mobilidade e a taxa de transporte de sedimentos através de alguns parâmetros adimensionais. O número de mobilidade é denotado por  $F_{gr}$ , e a sua definição geral é:

$$F_{gr} = (u^*{}^n / \sqrt{gD(\rho - 1)}) \times [v / \sqrt{32} \log(10 y_m / D)]^{1-n} \quad (63)$$

em que:  $u^*$  é a velocidade de atrito;  $\rho$  é a densidade do material sólido;  $y_m$  é a profundidade média;  $n$  é um expoente que depende da granulometria dos sedimentos,  $g$  é a aceleração da gravidade;  $v$  é a velocidade do escoamento e  $D$  é um diâmetro equivalente, também denominado por  $D_{35}$  diâmetro do grão, para o qual 35% do material do leito, por peso, são mais finos, em m.

O conceito de diâmetro dos grãos adimensional, aplicável a sedimentos grossos, médios e finos, corresponde à raiz cúbica da razão entre o peso específico,  $\rho$  e a viscosidade cinemática da água, em  $m^2.s^{-1}$ ,  $\nu$ :

$$D_{gr} = D [g(\rho - 1)/\nu^2]^{1/3} \quad (64)$$

O potencial de transporte de sedimentos adimensional geral pode ser expresso como:

$$G_{gr} = f(F_{gr}, D_{gr}) \quad (65)$$

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{Z} - 1 \right)^m \quad (66)$$

em que  $C$  e  $m$  são coeficientes empíricos;  $Z$  é o limiar de mobilidade.

$$G_{gr} = \frac{X \times D_e \times \left( \frac{u^*}{\nu} \right)^n}{\rho \times D} \quad (67)$$

em que  $X$  é o fluxo de sedimentos e  $D_e$  é a profundidade efetiva, com:

$$n = 1.00 - 0.56 \log D_{gr} \quad (68)$$

$$Z = 0.23 / \sqrt{D_{gr}} + 0.14 \quad (69)$$

$$m = 9.66/D_{gr} + 0.14 \quad (70)$$

$$\log C = 2.86 \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3.53 \quad (71)$$

(White e Ackers, 1973) uma função de carga total, desenvolvida a partir de dados do leito para gradações de sedimentos relativamente uniformes. Os coeficientes  $Z$ ,  $m$ ,  $n$  e  $C$  foram adequados à equação, baseados em amostras que incluíram uma variedade de configurações de leito.

No HEC-HMS, a densidade dos grãos dos sedimentos é especificada para o valor padrão de 2,65. A massa volúmica dos sedimentos de argila seca é definida com 480,55 kg/m<sup>3</sup>, a dos sedimentos de silte com 1,041 kg/m<sup>3</sup> e a dos sedimentos de areia seca, cascalho, pedras e pedregulhos com 1,490 kg/m<sup>3</sup>, não havendo distinção entre as várias subclasses.

O método de potencial de transporte requer também o cálculo da velocidade de queda das partículas sedimentares, cujos métodos de cálculo disponíveis no HEC-HMS incluem o *Report 12*, desenvolvido pela *Interagency Committee* em 1957, (Rubey, 1933), (Toffaletti, 1968) e (Rijn, 1993). Foi selecionada a teoria de (Rubey, 1933), que admite que a velocidade de queda uniforme de uma partícula depende da resistência oferecida pelo meio líquido. Para partículas de menores dimensões, esta resistência depende sobretudo da viscosidade do fluído, mas para as partículas maiores, esta resistência parece ser afetada pela turbulência do escoamento e pela viscosidade do fluído. Por outras palavras, as partículas de maiores dimensões sentem o “impacto” do fluído.

Areias muito finas e até mesmo a silte, podem ter a sua queda na água com velocidades dadas pela lei de Stokes, enquanto areias grossas e cascalhos necessitam de outra regra. Neste caso, a lei de Stokes pode ser combinada com a Lei do Impacto numa equação geral para velocidades de queda de qualquer tamanho de grão, acordando melhor, no entanto, com dados e amostras de grãos mais pequenos. A Lei do Impacto pode ser dada pela expressão (Farrell e Sherman, 2015):

$$w_0 = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} g \rho_f (\rho_s - \rho_f) \times d^3 + 36\eta^2} - 6\eta}{\rho_f d} \quad (72)$$

Em que  $\rho_s$  é a densidade de um grão de quartzo (2,65 em água e 2121 no ar);  $\rho_f$  é a densidade do fluído [1 para água (líquido)],  $d$  é o diâmetro da partícula em cm,  $\eta$  é o coeficiente de viscosidade.

Existem ainda dois sistemas de escala que determinam quantas categorias de granulometria influenciam o cálculo da erosão e do transporte de sedimentos ao longo do modelo de bacia. Os cálculos de erosão, deposição, sedimentação e transporte são realizados separadamente e independentemente para cada tamanho na escala de grau selecionada. O sistema *Clay Silt Sand Gravel* selecionado reconhece quatro classificações.

# 3

## CÁLCULO DO VOLUME DE SEDIMENTOS AFLUENTES À ALBUFEIRA DO TORRÃO

### 3.1. CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS

Conforme foi já referido, este trabalho pretende sistematizar, aplicar e comparar algumas das principais metodologias disponíveis para estimar os volumes de sedimentos afluentes a uma albufeira. Para atingir esse objetivo foi analisado o caso de estudo da albufeira do aproveitamento hidroelétrico do Torrão, que é explorado pela EDP.

Uma vez que a barragem do Torrão domina praticamente toda a bacia hidrográfica do rio Tâmega e não teve nenhuma barreira sedimentar a montante relevante até finais de 2020, data em que se iniciou o enchimento da barragem de Daivões, a análise da produção de sedimentos para a bacia do Tâmega constitui um interessante caso de estudo.

Entretanto, e no âmbito dos estudos sedimentológicos realizados pela EDP aquando do projeto do aproveitamento hidroelétrico de Fridão (EDP, 2011), foi avaliado o volume de sedimentos que se depositou na albufeira do Torrão desde o início da sua exploração, em 1988, até 2010 (22 anos). Para tal, procedeu-se a uma comparação entre os volumes da albufeira obtidos a partir de cartografia realizada antes da construção da barragem e obtidos a partir de uma cartografia realizada, em 2010, no âmbito do referido estudo.

A cartografia antiga corresponde a um levantamento aerofotogramétrico executado em 1983, à escala 1:2000, com curvas de nível de 2 em 2 m.

A cartografia de 2010 resultou de um levantamento batimétrico por sonar. Nesse levantamento toda a albufeira foi coberta com fiadas transversais espaçadas de 20 m e várias fiadas de verificação no sentido longitudinal, implantadas à escala 1:2000.

Ambos os levantamentos referidos foram analisados com *software* de informação geográfica, tendo-se estimado uma redução do volume total de armazenamento da albufeira, ao longo dos 22 anos, de 4,771 hm<sup>3</sup>. Com base neste volume, a EDP estimou-se uma produção de sedimentos média na bacia do Tâmega de 111 toneladas/km<sup>2</sup>/ano.

### 3.2. BARRAGEM DO TORRÃO

O aproveitamento hidroelétrico do Torrão (Fig. 8) localiza-se no rio Tâmega, 3,5 km a montante da sua confluência com o rio Douro e visa essencialmente a produção de energia elétrica. Entrou em

funcionamento em 1988 e é constituído fundamentalmente pela barragem-descarregador, circuitos hidráulicos e central equipada com dois grupos geradores do tipo reversível que permitem efetuar bombagem a partir da albufeira de Crestuma-Lever.

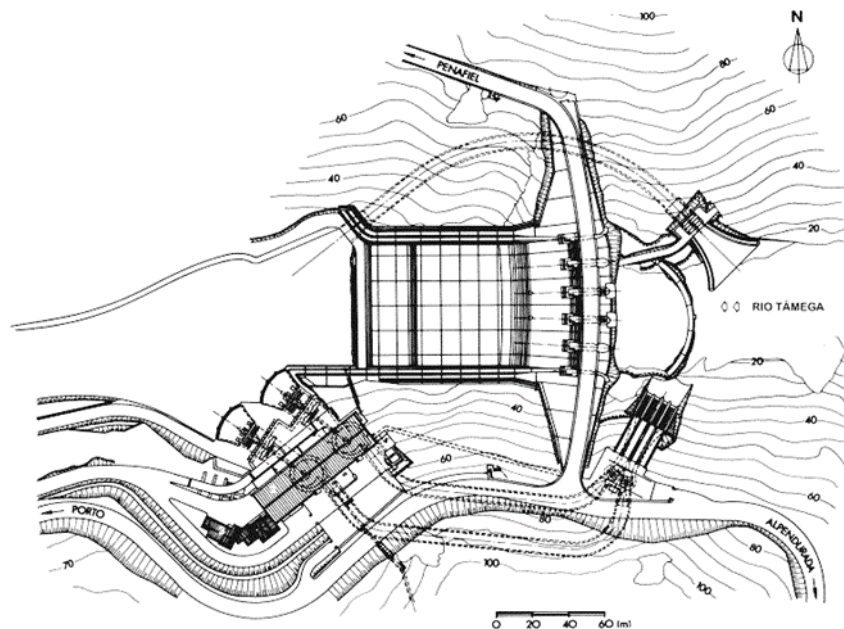


Fig. 8 - Planta da Barragem do Torrão, (CNPGB)

A barragem, do tipo gravidade, é aligeirada em grande parte do seu desenvolvimento por grandes vazamentos e apresenta uma curvatura em planta com raio de 400 m. A sua altura acima do ponto mais baixo das fundações é de 70 m.

A albufeira criada pela barragem estende-se pelo vale do rio Tâmega ao longo de cerca de 31 km, abrangendo os concelhos de Marco de Canaveses, Penafiel e Amarante. À cota do nível de pleno armazenamento (62,00) o volume armazenado bruto é de 124 hm<sup>3</sup>.

Os órgãos de segurança da barragem são constituídos por um descarregador de cheias e duas descargas de fundo.

O descarregador de cheias é constituído, fundamentalmente, por uma soleira descarregadora implantada na zona central do corpo da barragem, dividida em cinco vãos equipados com comportas segmento, à qual se segue uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico. O caudal máximo descarregado, com a albufeira à cota (66,50), é de 4900 m<sup>3</sup>/s.

As duas descargas de fundo estão implantadas no corpo da barragem, nas prumadas dos pilares centrais do descarregador de cheias. Os seus circuitos hidráulicos são iguais, sendo cada um composto, fundamentalmente, por uma galeria blindada que atravessa o corpo da barragem, equipada com duas comportas (uma de serviço e outra de segurança), do tipo vagão, montadas em série na zona da entrada. O caudal máximo descarregado pelas descargas de fundo, com a albufeira à cota (62,00), é de 236 m<sup>3</sup>/s.

A central, está situada na margem esquerda imediatamente a jusante da bacia de dissipação de energia do descarregador de cheias. O seu piso principal situa-se à cota (40,0) e está equipada com dois grupos reversíveis (turbina-bomba) constituídos por turbinas tipo Francis de eixo vertical, com 73150 kW de potência, acopladas a alternadores-motores trifásicos de 80 MVA. Os caudais máximos em turbinamento e em bombagem são, respetivamente, de 2x160 m<sup>3</sup>/s e 2x110 m<sup>3</sup>/s.

### 3.3. CARATERIZAÇÃO GERAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TÂMEGA

O rio Tâmega, um dos principais afluentes da margem direita do troço nacional do rio Douro, tem a sua origem em Espanha, na Serra de S. Mamede, cerca da cota (980). O seu curso desenvolve-se ao longo de aproximadamente 185 km, até atingir o rio Douro junto a Entre-os-Rios, aproximadamente à cota (5,0), estando o troço final sob influência da albufeira da barragem de Crestuma/Lever. A bacia hidrográfica do rio Tâmega está representada na (Fig. 9).

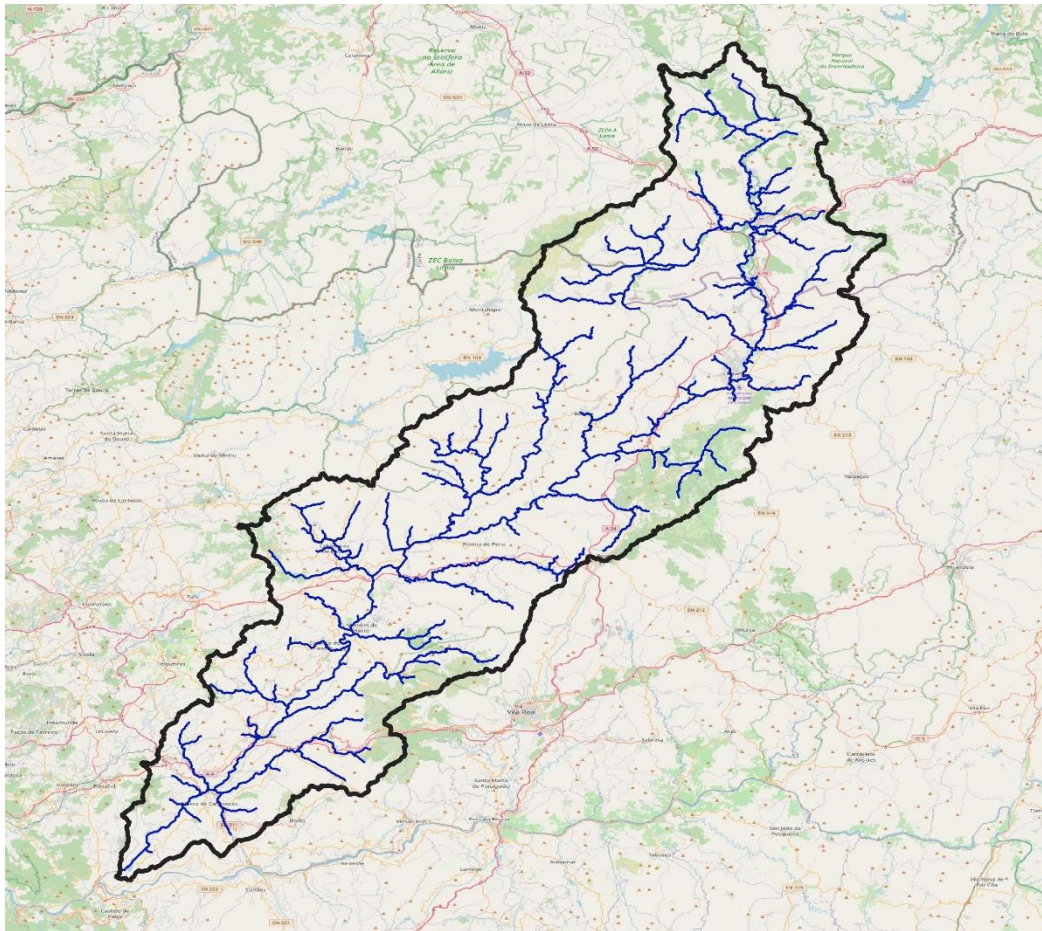


Fig. 9 - Bacia Hidrográfica do Tâmega

A sua bacia hidrográfica, que apresenta uma forma alongada, com uma largura média de cerca de 20 km, tem uma área total de aproximadamente 3300 km<sup>2</sup> (dos quais cerca de 80% em território nacional) e uma altitude média de 610 m. É limitada a leste pelas bacias dos rios Tua e Corgo, a oeste pelas bacias dos rios Cávado, Ave e Sousa e a norte (em território espanhol) pela bacia do rio Minho.

Após um curto troço inicial fortemente declivoso, onde o seu curso desce cerca de 500 m em 9 km, o rio Tâmega assume, ainda em Espanha, uma inclinação bem menos acentuada, entrando em Portugal já próximo da cota (350), em vale aberto através da Veiga de Chaves, que constitui a várzea de maior importância da bacia.

Esta região de planície aluvial é marcada por importantes fraturas de origem tectónica (responsáveis pela existência de numerosas e importantes nascentes termais, nomeadamente nas zonas de Verin, Chaves, Vidago e Pedras Salgadas), que se prolongam depois para sul do nosso país através do vale do Corgo, cruzando o rio Douro nas proximidades da Régua, atravessando seguidamente o rio Vouga próximo a S. Pedro do Sul e atingindo finalmente o abatimento de Mortágua-Tondela.

A jusante da Veiga de Chaves, o curso principal do Tâmega assume um declive sensivelmente uniforme de cerca de 0,003 m/m, apresentando-se o seu vale fortemente encaixado.

Neste troço a sua orientação é a correspondente à orografia dominante da região, NE-SW, enquanto no troço inicial (bacia espanhola) tem uma orientação predominantemente N-S.

Ao longo do seu percurso, o rio Tâmega é alimentado por numerosos afluentes em ambas as margens, referindo-se, de montante para jusante: na margem direita, os rios Assureira, Terva, Beça e Ouro; na margem esquerda, os rios Louredo, Olo e Ovelha.

Conforme foi já referido, é no troço final do rio Tâmega, cerca de 3,5 km a montante da sua confluência com o Douro, que se localiza a barragem do Torrão, objeto deste estudo. A bacia do Tâmega contribuinte para a secção do rio no local da barragem tem uma área de 3266 km<sup>2</sup>, que representa aproximadamente 99% da área total da bacia do Tâmega, e está limitada em grande parte da sua periferia por importantes sistemas montanhosos. Na linha divisória do lado poente existem as serras da Cabreira, Barroso e Larouco e na linha divisória do lado nascente pontuam as serras do Marão, Alvão e Padrela. Estas zonas de altitudes elevadas desempenham, como adiante se verifica, importantíssimo papel na distribuição das chuvas pela bacia. A cota máxima na bacia atinge os 1527 m (no pico do Larouco), a mínima 5 m e a altitude média, calculada através da curva hipsométrica, é de 614 m.

Do ponto de vista paleogeográfico e tectono-estratigráfico, o sector SW da bacia hidrográfica do rio Tâmega localiza-se na zona Centro-Ibérica e o seu sector NE, na zona da Galiza Média-Trás os Montes, é essencialmente constituído por terrenos que fazem parte do Maciço Antigo ou Hespérico.

O vale do Tâmega atravessa estes terrenos com uma direção geral próxima de NE-SW, dando origem a vales bastante encaixados com variações locais na orientação que refletem, frequentemente, o controle exercido pela fracturação e, por vezes, pela litologia.

No excerto da Carta Geológica à escala 1:500.000, apresentada na (Fig. 10), é possível observar que na região onde se insere esta bacia hidrográfica predominam os maciços rochosos graníticos implantados durante a orogenia Hercínica, incluindo formações rochosas metassedimentares Paleozóicas (autóctones ou alóctones) com idades que vão desde o Câmbrio ao Devónico, as quais foram gradualmente arrasadas pela erosão até à sua orografia atual, permitindo o extensivo afloramento das intrusões graníticas.

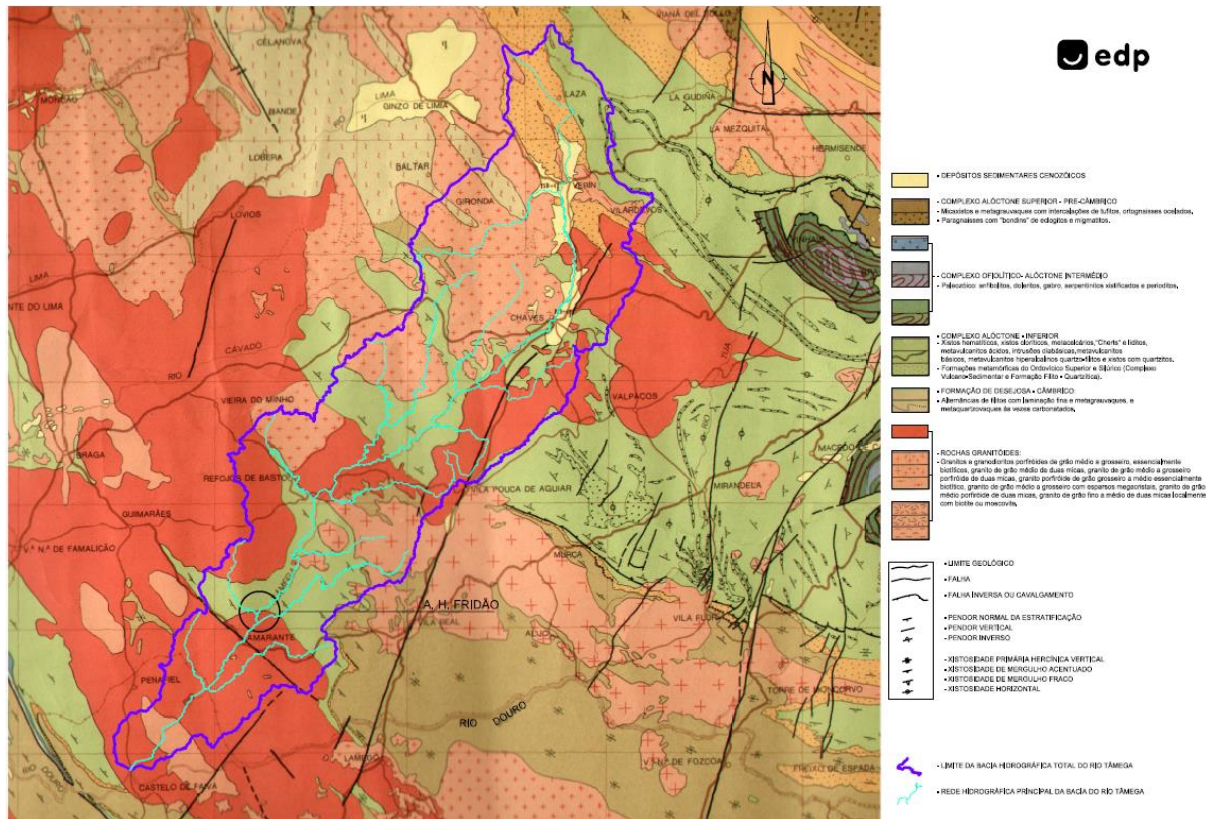


Fig. 10 - Carta Geológica à escala 1:500.000, (EDP, 2011)

Depositados em discordância sobre o soco cristalino e preservados da erosão em zonas tectonicamente deprimidas como, por exemplo, a Veiga de Chaves ou a Bacia de Verin, ocorrem depósitos aluviais de terraços, geologicamente recentes (Plio-Plistocénico), constituídos por cascalheiras, areias cascalhentas de granulometria variável e argilas que, no caso da Veiga de Chaves, podem atingir uma espessura de conjunto que pode ultrapassar os 400 m (Almeida et al., 2000).

As falhas geológicas observadas na região da bacia do Tâmega apresentam, geralmente, as seguintes orientações preferenciais: NNE-SSW a NE-SW, ENE-WSW a E-W e NW-SE.

Verifica-se a existência de uma boa correspondência entre os tipos litológicos e os tipos de solos assinalados na carta de solos do Atlas do Ambiente, sendo que, no presente caso, as rochas metassedimentares deram origem a litossolos e rankers, as rochas ígneas a cambissolos e os sedimentos, na bacia de Chaves e na bacia de Verin, a fluvisolos, muito férteis.

Quanto à permeabilidade das formações rochosas, é possível verificar na Carta Hidrogeológica de Portugal à escala 1:1.000.000 que as formações metassedimentares (com exceção dos quartzitos) apresentam permeabilidade muito reduzida, os maciços graníticos e os quartzitos, permeabilidade reduzida e os sedimentos da bacia de Chaves (e a de Verin, por analogia) permeabilidade variável a reduzida.

Em virtude da sua composição predominantemente argilosa, os pouco espessos litossolos que cobrem as formações metassedimentares deverão apresentar uma permeabilidade muito reduzida enquanto os solos predominantemente arenosos que cobrem os maciços graníticos e as rochas quartzíticas, deverão apresentar uma permeabilidade um pouco mais elevada.

Quanto às características de cobertura e utilização do solo da bacia do Tâmega, através da informação da carta de Uso do Solo do projeto CLC 2018 - Corine-Land Cover (Fig. 11) verifica-se que, em toda a zona dos vales das principais linhas de água existe bastante ocupação agrícola e grandes manchas de floresta. Nas zonas mais altas, a vegetação é predominantemente arbustiva, com alguns nichos de floresta e ainda algumas regiões desprovidas de vegetação. A ocupação urbana não é intensa na área da bacia hidrográfica, sendo apenas de referir algumas povoações dispersas, e sedes de concelho, entre as quais se destacam Chaves e Amarante, com áreas significativas de espaço artificializado.

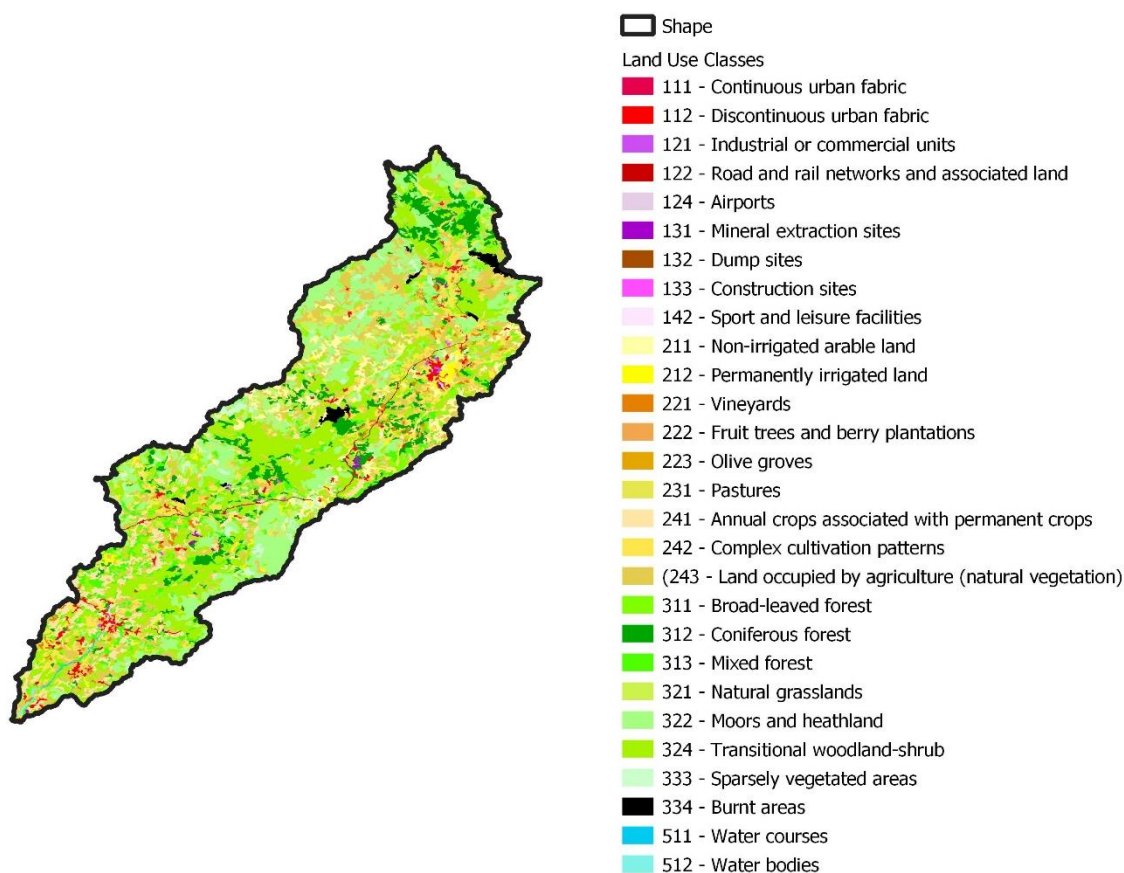


Fig. 11 - Carta de Uso do Solo do projeto CLC 2018 - Corine-Land Cover

Segundo a Classificação de Köppen, o clima do continente português está englobado no tipo Cs, ou seja, clima temperado húmido, com Verão seco. No entanto, são estabelecidas duas divisões nos subtipos Csa e Csb, cuja divisão se faz pela isotérmica dos 22°C no mês mais quente do ano. No primeiro caso, com temperaturas superiores àquele limite, estamos perante um clima temperado húmido, com Verão seco e quente. No segundo caso, com temperaturas inferiores àquele limite, o Verão é considerado seco, mas pouco quente, embora extenso, com mais de 4 meses em que a temperatura média é superior a 10°C. O clima da bacia do Tâmega está englobado neste último subtipo.

Relativamente às precipitações na bacia do Tâmega, é de referir que as massas de ar marítimo, arrastadas pelos ventos do SW e W, antes de encontrarem, no seu caminho para o interior, as serras da Cabreira, Barroso, Larouco, Marão, Alvão e Padrela, percorrem, desde o litoral, uma zona de cotas pouco elevadas e relativamente extensa. Assim, embora não originando nestas serras bruscas condensações, como acontece na faixa de elevações situada mais próxima da costa (como por exemplo, nas serras da Peneda

e do Gerês), ao encontrar as vertentes das referidas serras, essas massas de ar quente e húmido dão lugar a abundantes precipitações.

Segundo o mapa das isolinhas das precipitações médias anuais no período de 1957/58 a 1994/95 (Fig. 12), fornecido pela (EDP, 2011), na bacia total do Tâmega tem-se uma precipitação média anual da ordem dos 1300 mm.

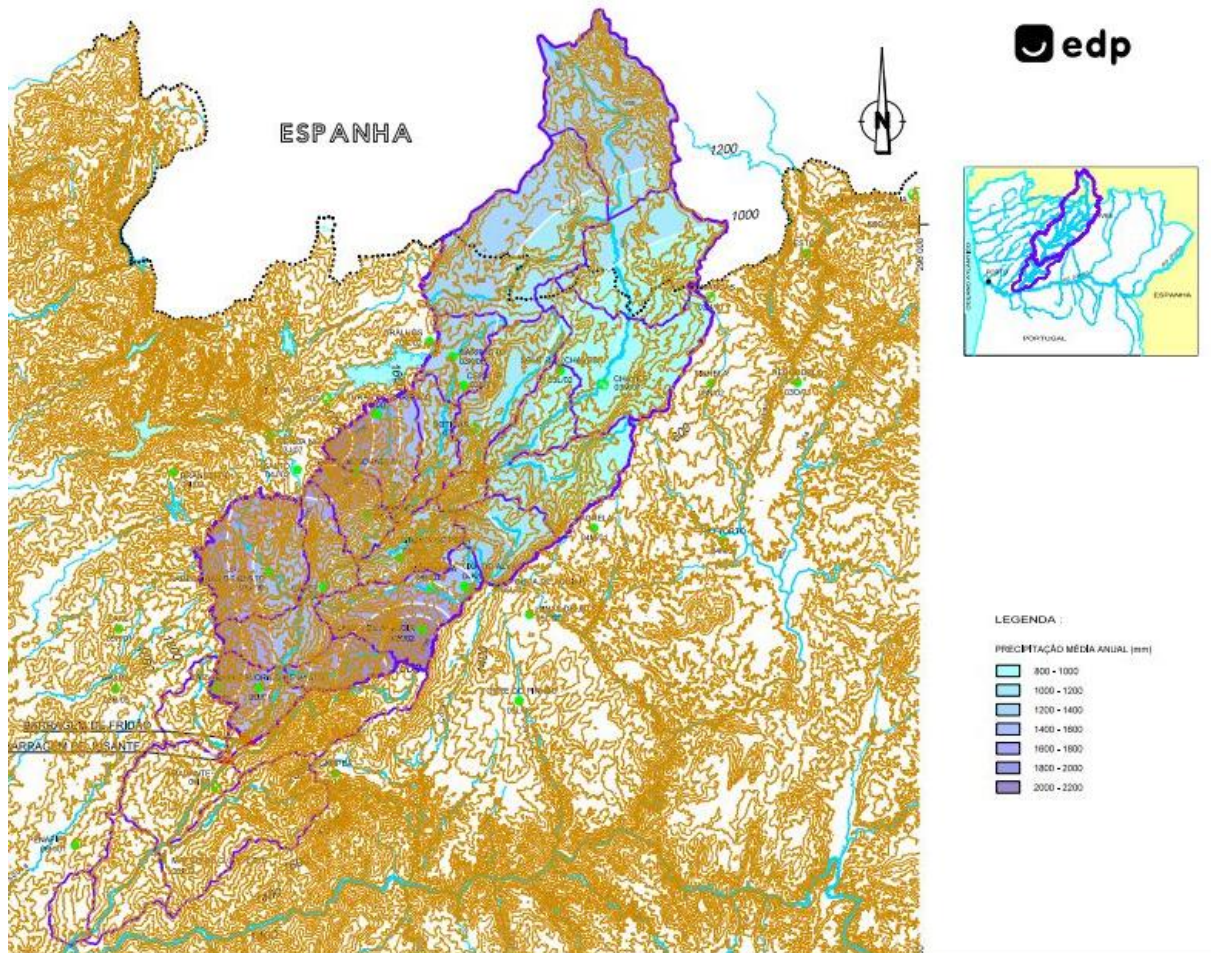


Fig. 12 - Mapa das isolinhas das precipitações médias anuais no período de 1957/58 a 1994/95, (EDP, 2011)

Ao percorrer a bacia de jusante para montante assinala-se uma vasta zona, desde a foz até próximo de Mondim de Basto, em que dominam precipitações com valores quase sempre acima da média da bacia, mais baixos a jusante e junto ao curso de água principal, e com variações relativamente reduzidas à medida que se caminha para os limites da bacia.

Logo a montante dos limites da bacia hidrográfica, surge uma primeira região de precipitações elevadas, ultrapassando mesmo os 2000 mm, associada às elevadas altitudes das serras do Alvão e Marão a sul e da Cabreira a norte. Esta barreira montanhosa provoca, para montante, um abaixamento significativo na precipitação, numa zona com razoável extensão, que se estende a cotas baixas desde Vidago, passando por Chaves, e penetrando em Espanha até Verin, onde se registam os valores mais reduzidos de toda a bacia (da ordem dos 600 mm).

Na área mais a noroeste da bacia, nova zona particularmente pluviosa se destaca, ultrapassando os 1800 mm, correspondendo às serras do Barroso e Larouco, junto às nascentes dos rios Rabagão, Beça, Cávado e Assureira, próximo da fronteira com Espanha.

A montante de Verin, e até à nascente do Tâmega, a pluviosidade volta a aumentar, embora menos significativamente, ultrapassando-se o valor médio da bacia apenas na região da cabeceira.

### 3.4. ELEMENTOS DE BASE

Nos pontos seguintes referem-se os principais elementos de base usados neste estudo. São eles: o modelo digital de elevação, usado na obtenção das características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Tâmega; os mapas dos fatores que intervêm na Equação Universal de Perda dos Solos; e os dados hidro-meteorológicos, necessários à aplicação do modelo de simulação hidrológica.

#### 3.4.1. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO - DEM

O Modelo Digital de Elevação, cuja sigla em inglês é DEM, *Digital Elevation Model*, pode ser visto como uma generalização cartográfica e como uma representação quantitativa da superfície da Terra, que fornece informações básicas sobre o relevo do terreno (Guth, 2006). Podendo ser gerado através de diferentes técnicas, como métodos fotogramétricos, levantamentos topográficos, fotografias aéreas ou interpolação de mapas de contornos de elevação, o DEM e os seus atributos derivados, como o declive, a área e a rede de drenagem, entre outros, são importantes em qualquer processo de análise de terreno (Wolock e Price, 1994).

O DEM é geralmente apresentado por uma camada *raster* de cores ou contornos de elevação e é um pré-requisito para diferentes aplicações, como a criação de mapas de relevo, a modelação hidrológica, a simulação e gestão de cheias, estudos de clima e estudos meteorológicos. Os resultados dos modelos vão depender da precisão do DEM, existindo sempre algum tipo de erro, associado à fonte de extração ou origem do modelo digital de elevação.

A aquisição de dados DEM, pode ser realizada através do ASTER GDEM (30 m, (Frey e Paul, 2012)). O Modelo de Elevação Digital Global (GDEM) do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) foi desenvolvido em conjunto pelo METI (*Ministry of Economy, Trade and Industry*) do Japão e pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) dos Estados Unidos. O sensor ASTER foi lançado a bordo da nave Terra da NASA, em dezembro de 1999. A resolução espacial do DEM gerado é de 30 m. Além disso, a precisão vertical absoluta do ASTER GDEM alcança os 20 m, com nível de confiança de 95%. Desta forma, através do *Earth Data Search* é possível definir um “retângulo de coordenadas” a sudoeste e nordeste, a partir do qual pode ser obtida, por correspondência, uma série de *granules* – subimagens em que os dados, colecionados pelo satélite AIRS - *Atmospheric Infrared Sounder*, são divididos à medida que o AIRS percorre a órbita. O DEM pode, desta forma, ser descarregado e processado em formato *raster* nas ferramentas SIG para posterior análise.

Na (Fig. 13) é apresentado o DEM da zona da bacia hidrográfica do Tâmega usado neste estudo, o qual foi obtido do *NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)* gerido pelo *NASA's Earth Science Data and Information System (ESDIS) Project* em *Earthdata Search*, a partir de 4 *granules*.

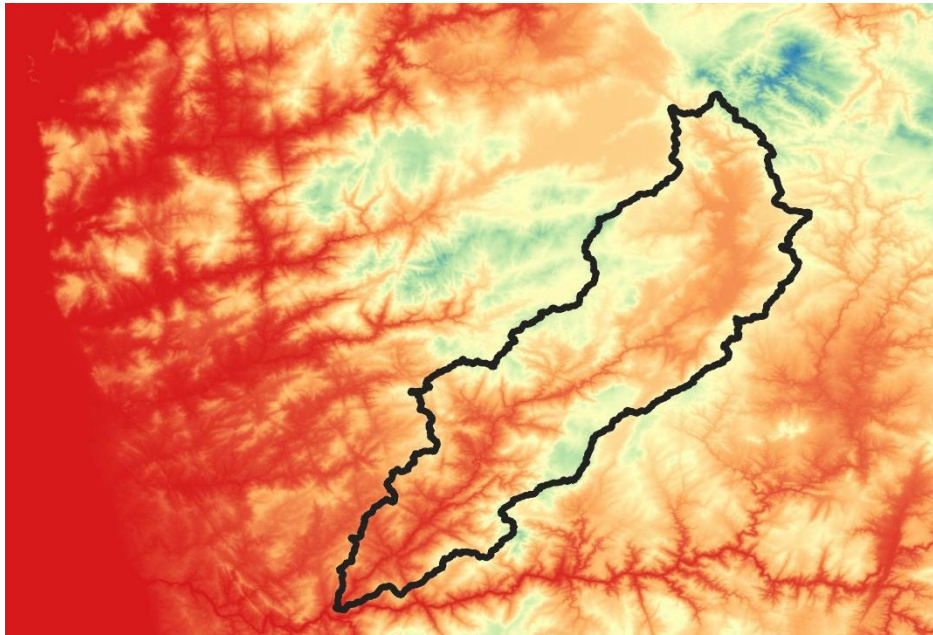


Fig. 13 - DEM obtido a partir de 4 granules na região da bacia hidrográfica do Tâmega, (Earthdata, 2021)

#### 3.4.2. MAPAS DOS FATORES DO MODELO USLE/RUSLE

O *European Soil Data Centre, Joint Research Centre* da Comissão Europeia, é o centro de dados do solo na Europa. Estes dados e informações de solo a nível europeu são armazenados no *European Soil Data Center*, com diferentes detalhes espaciais:

- *European Soil Database v2.0*

O *European Soil Database* (ESDB) fornece dados pan-europeus para 73 atributos do solo primários ou derivados. Os dados principais incluem informações com uma cobertura espacial sobre (i) classificação do solo (ii) textura (iii) material original (iv) camada impermeável no perfil do solo (v) regime de água do solo (vi) limitações para o uso de solo agrícola.

- *LUCAS topsoil database*

O inventário *LUCAS topsoil database* reuniu cerca de 20.000 amostras de solo superficial em 25 Estados-Membros da União Europeia (UE), (UE-27, exceto Bulgária e Roménia), com o objetivo de produzir o primeiro banco de dados pan-europeu físico e químico de solo superficial. A amostragem do solo foi realizada no âmbito do *Land Use/Land Cover Area Frame Survey* (LUCAS), um projeto que promove a monitorização das mudanças na gestão e na configuração da superfície terrestre da União Europeia.

- *Biosoil data*

Foram reunidas amostras de solo de mais de 4.000 parcelas sob vegetação florestal em toda a União Europeia para o projeto *Biosoil*. Os dados *Biosoil* têm origem em duas redes de locais diferentes: (i) rede de locais para monitorização sistemática das condições florestais e (ii) locais para monitorização intensiva das condições florestais. As amostras foram analisadas quanto às principais propriedades físicas (textura, densidade aparente) e químicas (teor de carbono orgânico).

O European Soil Data Centre fornece também os mapas relativos a cada um dos fatores da RUSLE, que resultam das camadas de entrada mais atualizadas de precipitação, solo, topografia, uso e gestão do solo.

Os fatores de entrada da fórmula empírica RUSLE são representados em mapas que têm por base a avaliação do fator de erodibilidade do solo (Panagos et al., 2014), a erosividade da chuva (Panagos et al., 2015a), o fator de cobertura vegetal e uso de solo (Panagos et al., 2015b), o fator topográfico (Panagos, Borrelli e Meusburger, 2015c) e o fator de práticas de conservação (Panagos et al., 2015d).

A textura do solo, bem como a sua composição em argila, silte e areia também foram avaliados por mapas a nível europeu (Ballabio et al., 2016).

### 3.4.3. DADOS HIDRO-METEOROLÓGICOS

#### 3.4.3.1. Precipitações

A caracterização pluviométrica de uma bacia hidrográfica implica a prévia seleção de um período de observação que englobe um número suficiente de postos udométricos e que detenha suficiente extensão temporal, de modo a garantir uma cobertura espacial e temporal adequadas. Desta forma, para a definição da precipitação usada no modelo de simulação hidrológica, foram selecionados da base de dados disponível no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos - SNIRH os oito postos cujas principais características são apresentadas na (Tabela 6) e com as localizações indicadas na (Fig. 14).

Face aos registos disponíveis, o período considerado neste estudo foi o compreendido entre o ano de 1980 e o ano de 1993 (13 anos).

Tabela 6 - Postos Udométricos selecionados

| Estação             | Tipo de Dados | Longitude | Latitude | Altitude | Período com registos contínuos |
|---------------------|---------------|-----------|----------|----------|--------------------------------|
|                     |               | °         | °        | (m)      |                                |
| Amarante            | Precipitação  | 41,26     | -8,07    | 146      | 01/10/1932 – 01/10/1997        |
| Boticas             |               | 41,69     | -7,67    | 501      | 01/10/1947 – 01/10/1994        |
| Cabeceiras de Basto |               | 41,51     | -7,98    | 263      | 01/10/1913 – 01/10/1998        |
| Celorico de Basto   |               | 41,38     | -8,00    | 227      | 01/10/1942 – 01/10/1994        |
| Chaves              |               | 41,73     | -7,46    | 350      | 01/10/1941 – 01/10/2000        |
| Lixa do Alvão       |               | 41,50     | -7,69    | 939      | 01/10/1946 – 01/10/1997        |
| Travancas           |               | 41,83     | -7,31    | 884      | 01/10/1955 – 01/10/2009        |
| Alturas do Barroso  |               | 41,70     | -7,82    | 1068     | 01/10/1946 – 01/10/1995        |



Fig. 14 - Postos Udométricos selecionados para o estudo

Foram analisadas as séries das precipitações anuais e das precipitações diárias para o período de referência selecionado, e relativas ao conjunto de postos considerado, para caracterizar o regime de precipitações na bacia. As correspondentes precipitações anuais estão registadas na (Tabela 7).

Tabela 7 - Precipitações Anuais para os postos seleccionados

| Estação                 |      | ALTURAS<br>DO<br>BARROSO | AMARANTE | BOTICAS | CABECEIRAS<br>DE BASTO | CELORICO<br>DE BASTO | CHAVES | LIXA DO<br>ALVÃO | TRAVANCAS |
|-------------------------|------|--------------------------|----------|---------|------------------------|----------------------|--------|------------------|-----------|
| Precipitação Anual (mm) | 1980 | 1261,00                  | 937,00   | 783,80  | 865,20                 | 1118,20              | 504,90 | 576,40           | 732,30    |
|                         | 1981 | 1691,70                  | 1157,70  | 1018,30 | 1137,50                | 1405,40              | 600,20 | 1093,60          | 821,60    |
|                         | 1982 | 1891,80                  | 1288,90  | 1163,00 | 1458,80                | 1749,70              | 684,30 | 1080,60          | 913,60    |
|                         | 1983 | 1678,80                  | 1253,70  | 1000,90 | 1217,90                | 1574,00              | 606,30 | 1195,80          | 899,30    |
|                         | 1984 | 2267,10                  | 1525,00  | 1599,30 | 1593,10                | 2209,20              | 830,10 | 1895,30          | 996,20    |
|                         | 1985 | 1949,70                  | 1268,30  | 1312,30 | 1429,00                | 1865,30              | 610,90 | 1443,60          | 886,70    |
|                         | 1986 | 1331,10                  | 860,30   | 1026,40 | 1059,00                | 1241,00              | 564,40 | 1033,60          | 755,20    |
|                         | 1987 | 2218,40                  | 1392,60  | 1550,60 | 1858,90                | 1904,20              | 843,30 | 1582,30          | 1132,10   |
|                         | 1988 | 1055,30                  | 681,50   | 648,80  | 894,60                 | 1183,40              | 527,80 | 805,00           | 514,70    |
|                         | 1989 | 1752,60                  | 963,70   | 1231,70 | 1249,50                | 1450,40              | 799,30 | 1281,30          | 996,20    |
|                         | 1990 | 1704,50                  | 1093,20  | 1010,60 | 1560,00                | 1861,00              | 598,50 | 1399,70          | 901,00    |
|                         | 1991 | 1203,60                  | 870,40   | 834,70  | 1036,00                | 1142,50              | 440,30 | 1029,70          | 606,60    |
|                         | 1992 | 1409,60                  | 1111,80  | 912,20  | 1308,10                | 1414,70              | 500,70 | 1174,60          | 843,00    |
|                         | 1993 | 1923,10                  | 1426,20  | 1261,20 | 1825,50                | 1950,20              | 687,60 | 1678,30          | 1079,50   |

As séries das precipitações diárias foram também comparadas entre si, e com postos vizinhos, de forma a analisar a fiabilidade dos registos e a detetar possíveis discrepâncias entre valores de precipitação em regiões próximas. Os gráficos seguintes (Fig. 15 a 20) apresentam as séries de precipitações médias diárias, ao longo da janela de tempo seleccionada.

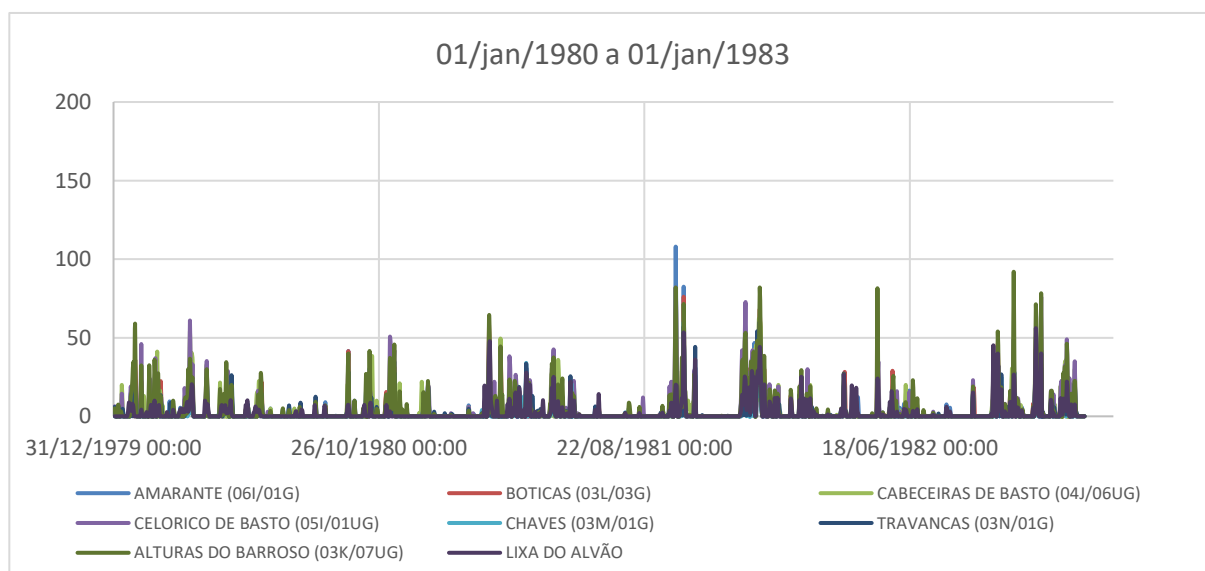


Fig. 15 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Seleccionados entre 01/jan/1980 e 01/jan/1983

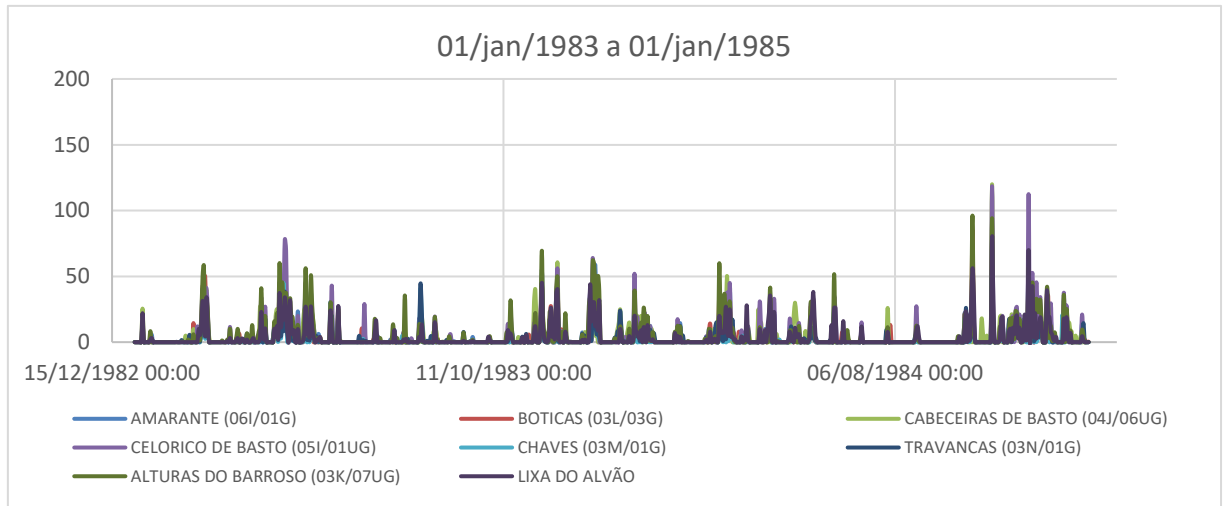


Fig. 16 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Seleccionados entre 01/jan/1983 e 01/jan/1985

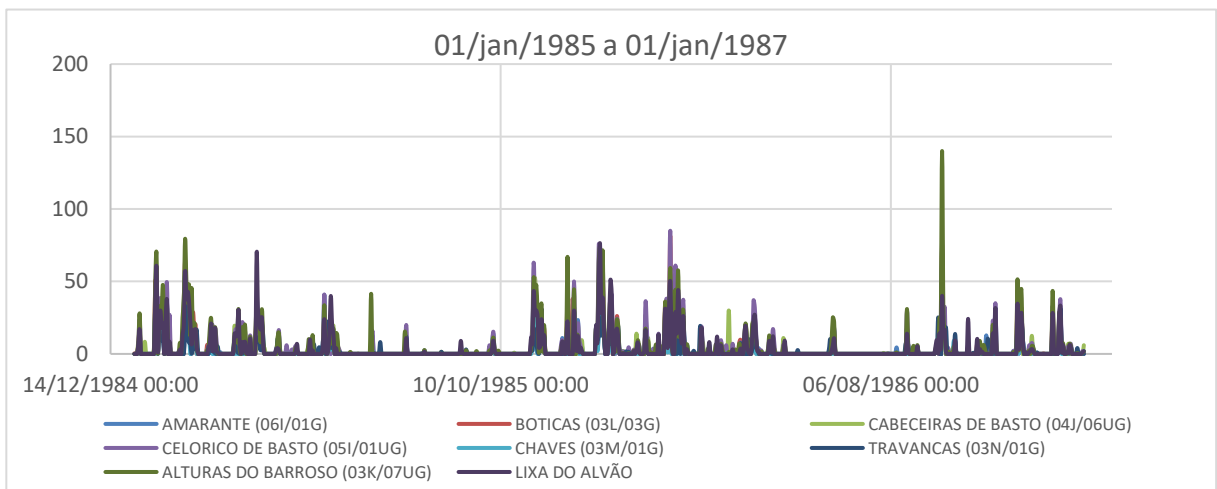


Fig. 17 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Seleccionados entre 01/jan/1985 e 01/jan/1987

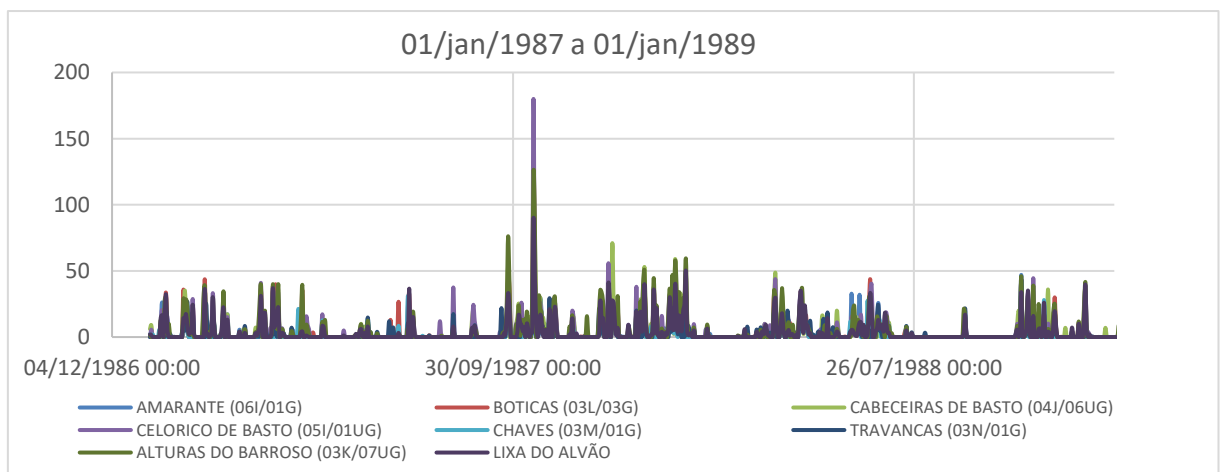


Fig. 18 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Seleccionados entre 01/jan/1987 e 01/jan/1989

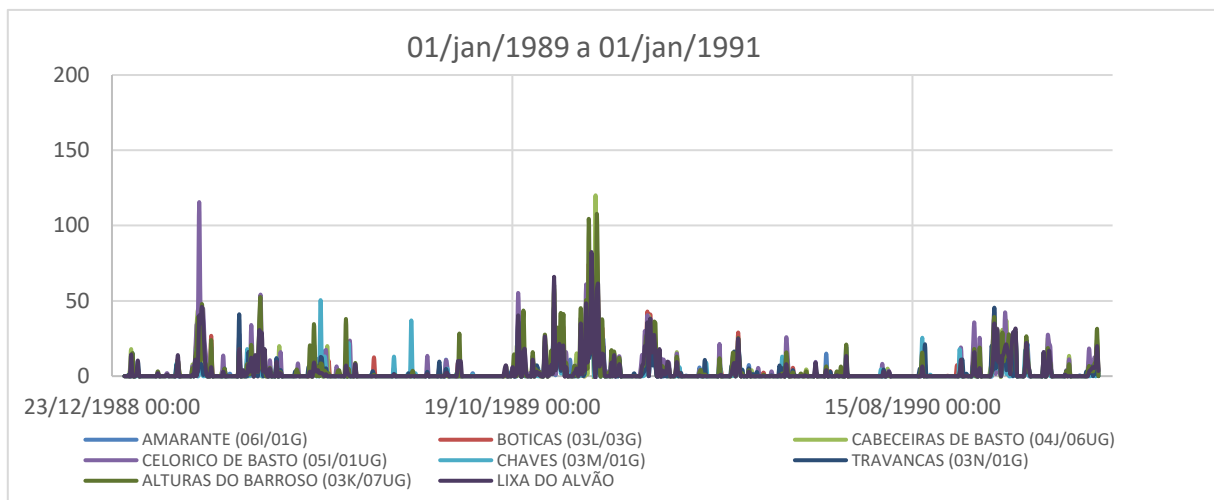


Fig. 19 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Seleccionados entre 01/jan/1989 e 01/jan/1991

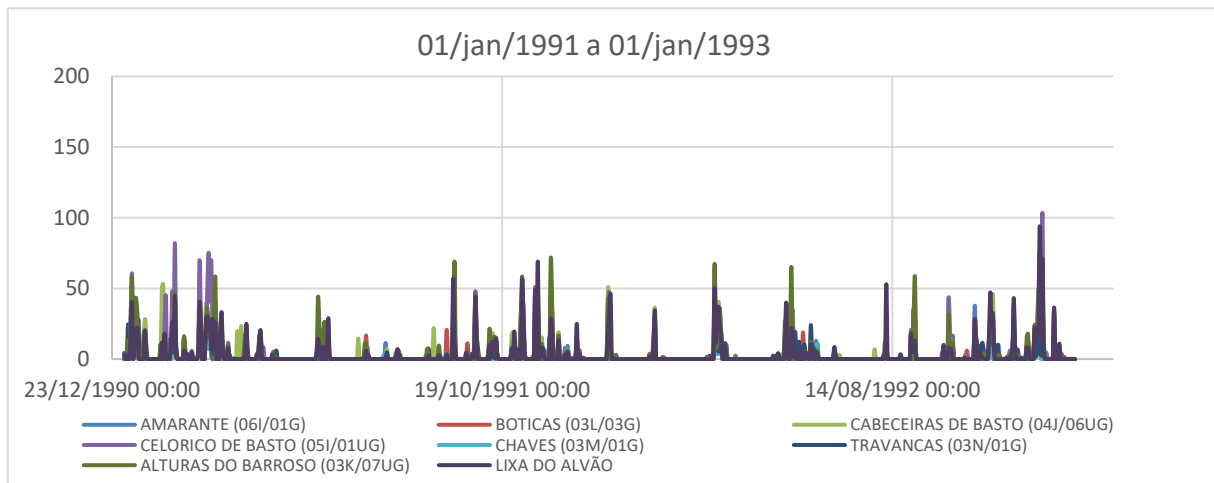


Fig. 20 - Gráfico de Séries de Precipitações Diárias para os Postos Seleccionados entre 01/jan/1991 e 01/jan/1993

Da análise dos gráficos anteriores, é possível verificar que as séries de precipitações diárias dos oito postos considerados têm andamentos semelhantes, não se registando picos desfasados. Destacam-se períodos de precipitação mais intensa em setembro de 1981, com Amarante a registar o maior valor. De seguida, evidenciam-se os meses de outubro e novembro de 1984, com Celorico de Bastos a registar a maior intensidade de precipitação. Em outubro de 1987, Celorico de Bastos regista novamente um dos maiores valores da série e o mesmo se repete em fevereiro de 1989. Em 1989 distingue-se um outro evento, correspondente a uma cheia no final de dezembro, com elevados picos registados em todos os postos.

#### 3.4.3.2. CAUDAIS

No processo de calibração do modelo de simulação hidrológica é necessário dispor dos caudais observados em seções da rede hidrográfica da bacia, que resultaram das precipitações atrás referidas.

Neste estudo foram considerados os registos de caudais de duas estações que se situam no curso principal do rio Tâmega: Ponte Cavez e Fridão.

A estação hidrométrica de Ponte Cavez, que entrou em funcionamento em 1956, situa-se no curso principal do rio Tâmega, na secção com as seguintes coordenadas: Latitude 41° 30' 44'' e Longitude (Lisboa) 1° 14' 30''E. Domina uma bacia hidrográfica com uma área de cerca de 2.000 km<sup>2</sup>

A estação hidrométrica de Fridão, que entrou em funcionamento 1985, localiza-se também no curso principal do rio Tâmega, na secção com as coordenadas seguintes: Latitude 41° 19' 13'' e Longitude (Lisboa) 1° 06' 38''E. A área da bacia dominada por esta estação é de 2.615 km<sup>2</sup>

Na (Fig. 21) são indicadas as localizações destas duas estações e nos gráficos (Fig. 22 a 25) apresentam-se os registos dos caudais médios diários observados nas mesmas no período de 1 de janeiro de 1980 a 1 de janeiro de 1993.

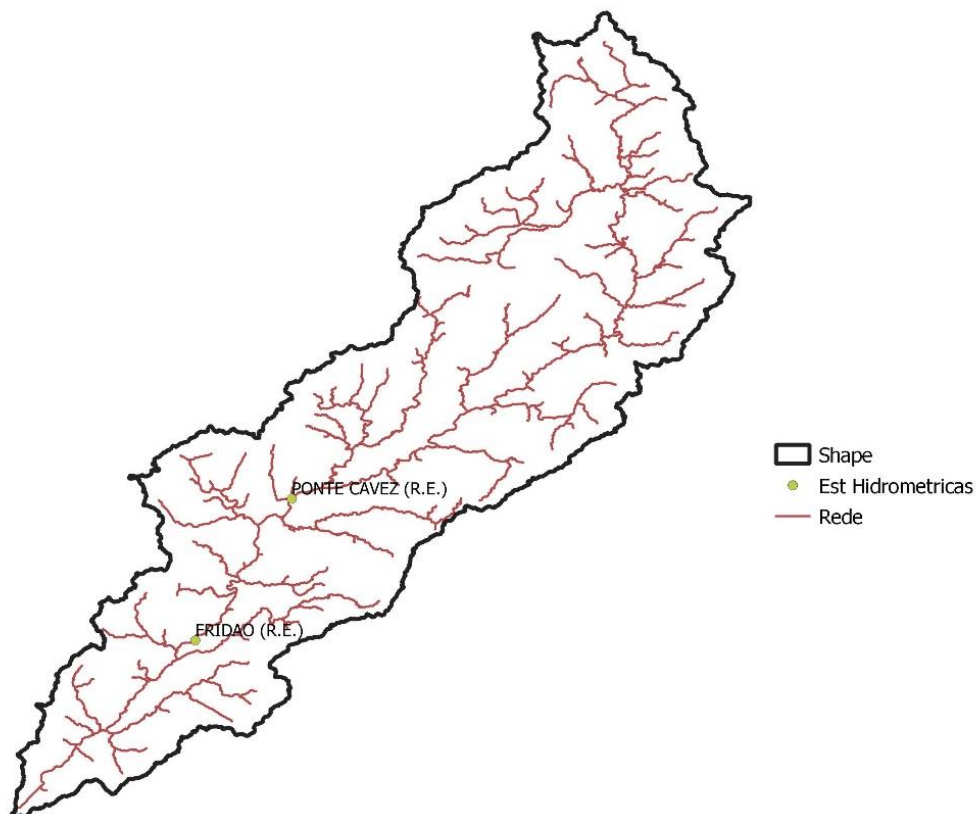


Fig. 21 - Estações Hidrométricas seleccionadas para o caso de estudo: Fridão e Ponte Cavez

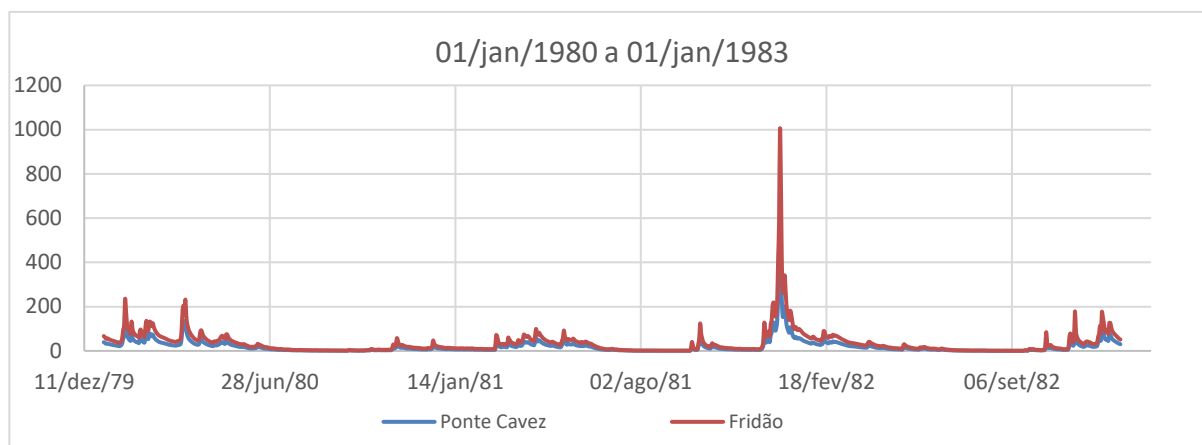


Fig. 22 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1980 e 01/jan/1983

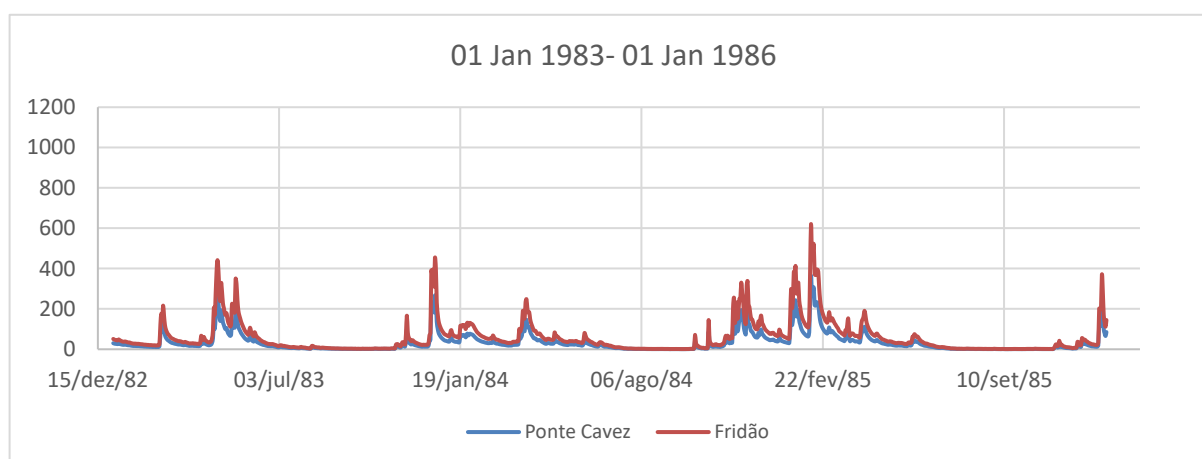


Fig. 23 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1983 e 01/jan/1986

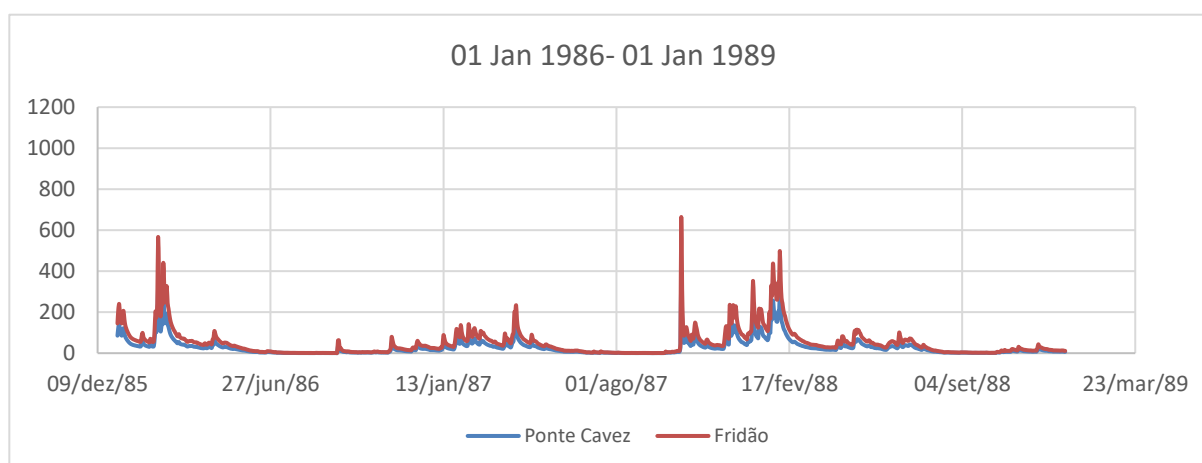


Fig. 24 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1986 e 01/jan/1989

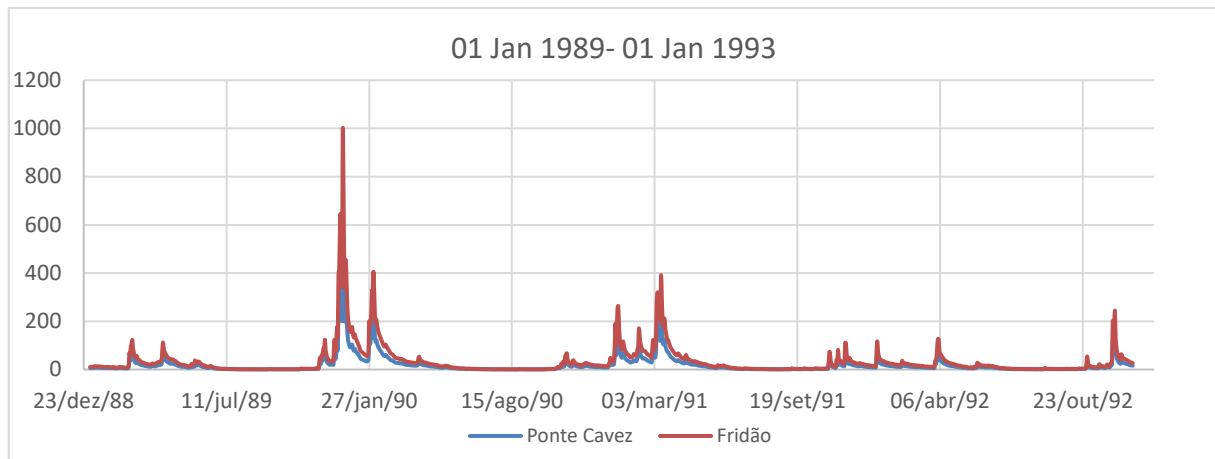


Fig. 25 - Gráfico de Registo de Caudais médios diários observados em Ponte Cavez e Fridão entre 01/jan/1989 e 01/jan/1993

Nos gráficos exibidos, são notórios alguns picos de caudais registados, associados a determinados períodos de precipitação, referidos anteriormente. São de realçar os máximos atingidos em 1981, 1984, 1987 e 1989.

### 3.5. CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PELO MODELO RUSLE

Neste capítulo apresenta-se uma estimativa do volume de sedimentos que pode afluir à albufeira da barragem do Torrão utilizando a Revisão da Equação Universal da Perda de Solos (RUSLE) para calcular a erosão hídrica média na bacia do rio Tâmega.

#### 3.5.1. EROSIÃO HÍDRICA

Conforme foi referido no Capítulo 2, através da RUSLE é possível determinar a taxa média anual de perda de solo por erosão segundo a expressão:

$$E = R \times K \times C \times P \times LS \quad (1)$$

sendo:  $E$ , a perda média anual de solo ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ );  $R$ , o fator de erosividade da chuva ( $\text{MJ.mm}/(\text{ha.h.ano})$ );  $K$ , o fator de erodibilidade do solo ( $t.ha.h/(\text{ha.MJ.mm})$ );  $C$ , o fator de cobertura vegetal e uso de solo (adimensional);  $P$ , o fator de práticas de conservação (adimensional) e  $LS$ , o fator de comprimento e de inclinação da encosta (adimensional).

##### 3.5.1.1. Fator de Erosividade

O fator de erosividade da chuva,  $R$ , foi analisado com os mapas obtidos através da ESDAC, *European Soil Data Centre*. Esses mapas são resultado de um estudo realizado ao nível da Europa (Panagos et al., 2015a), tendo a determinação do fator sido baseado nos métodos e fórmulas apresentadas no Subcapítulo 2.2.1.

Na (Fig. 26) apresenta-se a distribuição do fator de erosividade R ao longo da bacia do Tâmega.

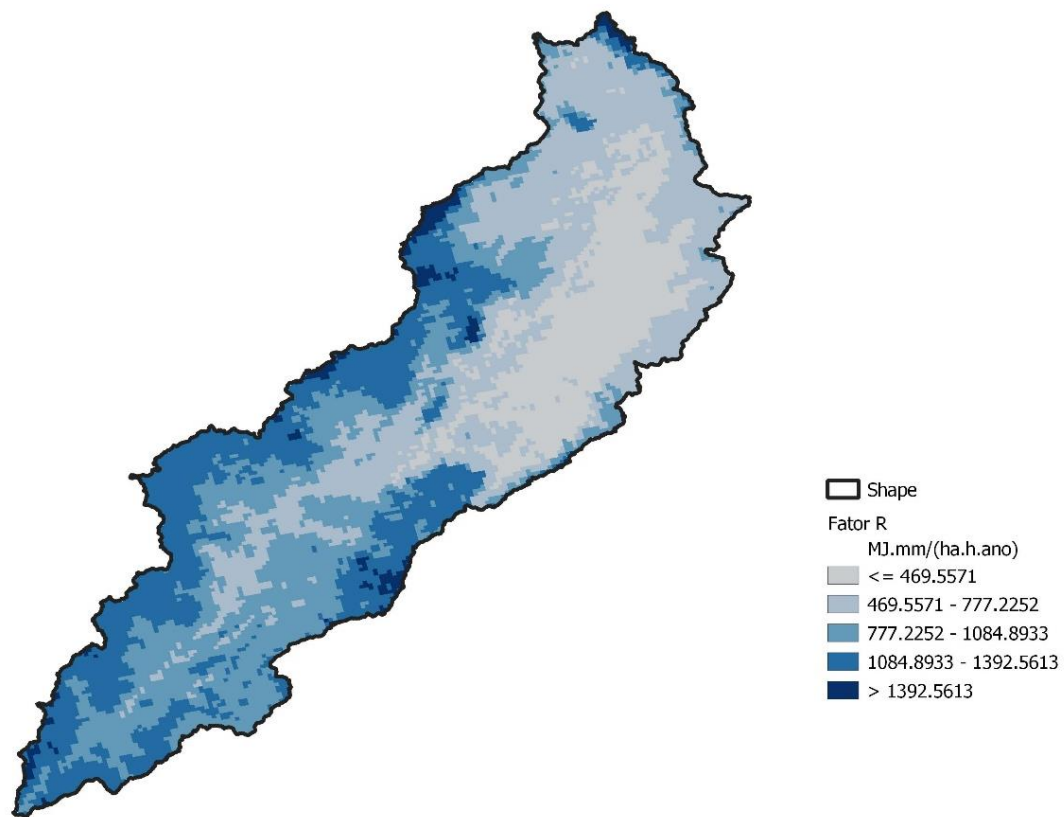


Fig. 26 - Fator de Erosividade, R - (Panagos et al., 2015a)

O valor da erosividade obtido para a bacia hidrográfica do rio Tâmega foi de 838,85 MJ.mm/(ha.h.ano), valor ligeiramente superior à erosividade média nacional de 775,1 MJ.mm/(ha.h.ano)(Panagos et al., 2015a).

#### 3.5.1.2. Fator Topográfico

O fator topográfico corresponde ao produto dos fatores L, fator da extensão da inclinação longitudinal e S, fator de inclinação longitudinal. A metodologia apresentada por (Panagos, Borrelli e Meusburger, 2015c) para estimar o fator LS, utiliza um Modelo de Elevação Digital de alta resolução a 25 m e aplica o algoritmo de (Desmet e Govers, 1996), que determina os fatores L e S de acordo com as fórmulas apresentadas no Subcapítulo 2.2.2.

Na (Fig. 27) apresenta-se a distribuição do fator topográfico, LS, ao longo da bacia do Tâmega.

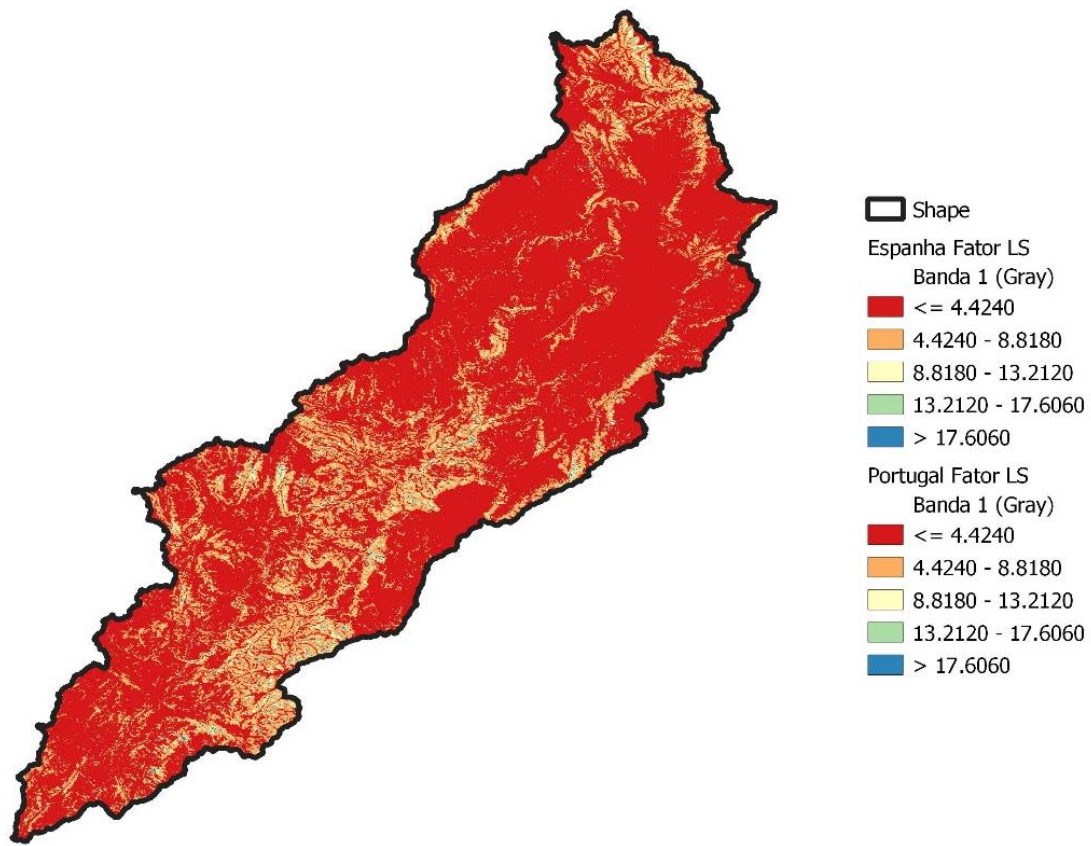


Fig. 27 - Fator Topográfico, LS - (Panagos et al., 2015c)

O fator topográfico obtido para a bacia hidrográfica do rio Tâmega apresentou uma média de 3,22, valor bastante superior ao fator topográfico nacional estimado de 1,80 (Panagos, Borrelli e Meusburger, 2015c).

#### 3.5.1.3. Fator de Erodibilidade

O fator K representa um valor anual da reação do solo ao processo de destacamento e transporte de partículas do solo. A nível europeu, (Panagos et al., 2014) estimaram o fator de erodibilidade do solo com base nalguns atributos do solo disponíveis nos dados do *Topsoil Survey* (LUCAS), expresso através de uma aproximação algébrica a um nomograma a uma fórmula empírica, apresentada no Subcapítulo 2.2.3.

Na (Fig. 28) apresenta-se a distribuição do fator de erodibilidade, K, ao longo da bacia do Tâmega.

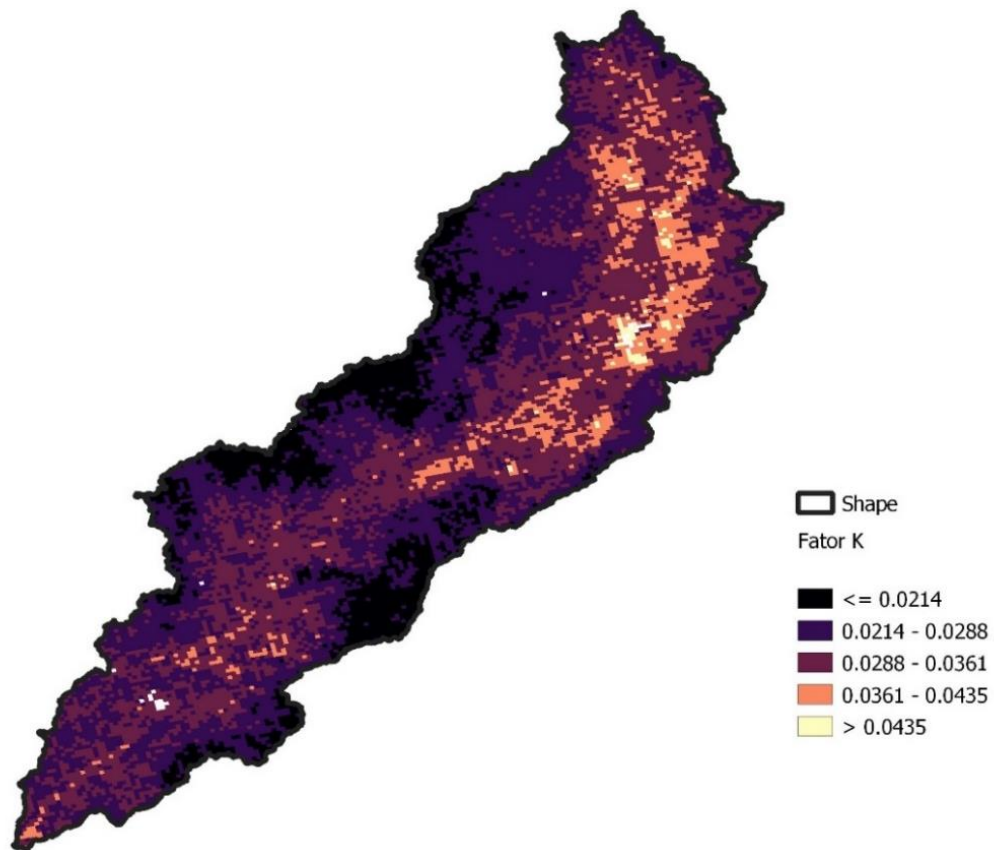


Fig. 28 - Fator de Erodibilidade, K - (Panagos et al., 2014)

O valor do fator da erodibilidade obtido para a bacia hidrográfica do rio Tâmega foi de 0,0282 t. ha.h/ha.MJ.mm, valor ligeiramente abaixo da estimativa da erodibilidade média nacional de 0,0333 t. ha.h/ha.MJ.mm (Panagos et al., 2014).

#### 3.5.1.4. Fator de Cobertura e Práticas Culturais

O estudo do fator de cobertura a nível europeu, (Panagos et al., 2015b) teve por base o mapa *CORINE Land Cover* e dados estatísticos agrícolas do Eurostat NUTS (Nomenclatura de Unidades Territoriais Estatísticas), bem como o Modelo LANDUM, como referido no Subcapítulo 2.2.4.

Na (Fig. 29) apresenta-se a distribuição do fator de cobertura e práticas culturais, C, ao longo da bacia do Tâmega.

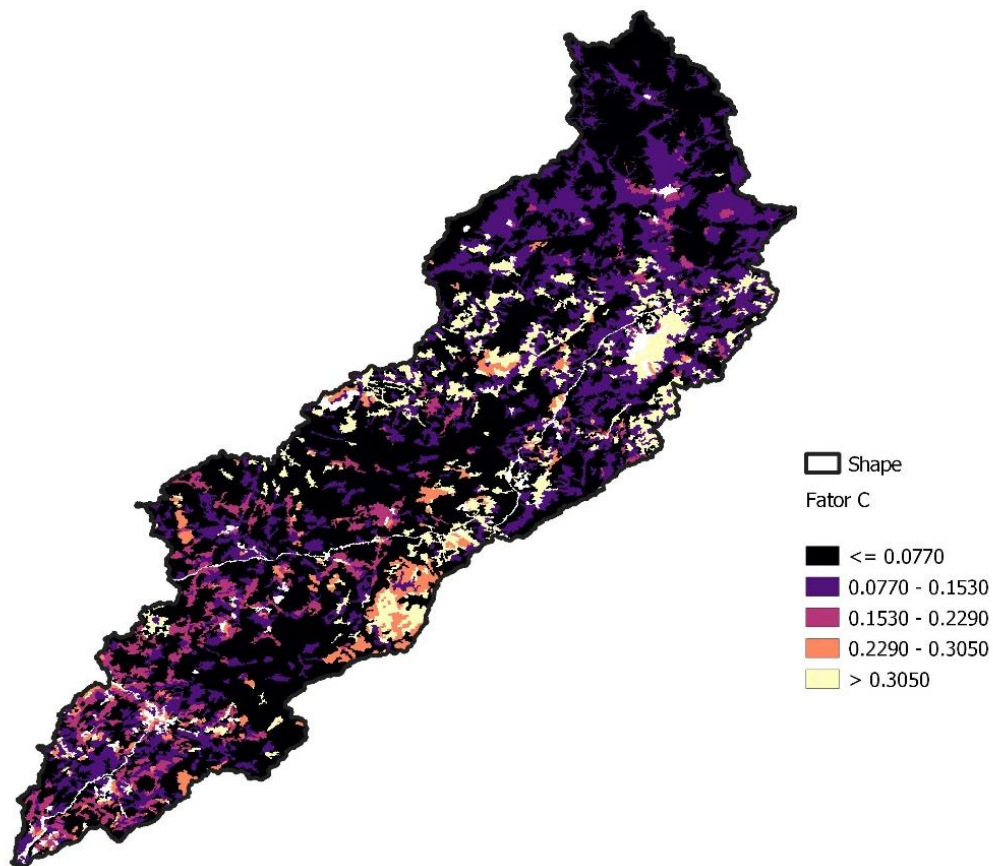


Fig. 29 - Fator de Cobertura Vegetal e Uso de Solo, C - (Panagos et al., 2015b)

O valor do fator da cobertura obtido para a bacia hidrográfica do rio Tâmega foi de 0,095, face à estimativa do fator de cobertura médio nacional de 0,123 (Panagos et al., 2015b).

#### 3.5.1.5. Fator de Práticas de Conservação

O fator de práticas de conservação foi estimado com base em dados de observação à escala europeia (Panagos et al., 2015d) e tendo em conta as políticas agroambientais implementadas nos vários Estados-Membros. O fator P foi proposto como um produto de 3 subfactores, por (Blanco e Lal, 2008), como apresentado no Subcapítulo 2.2.5.

Na (Fig. 30) apresenta-se a distribuição do fator de práticas de conservação, P, ao longo da bacia do Tâmega.

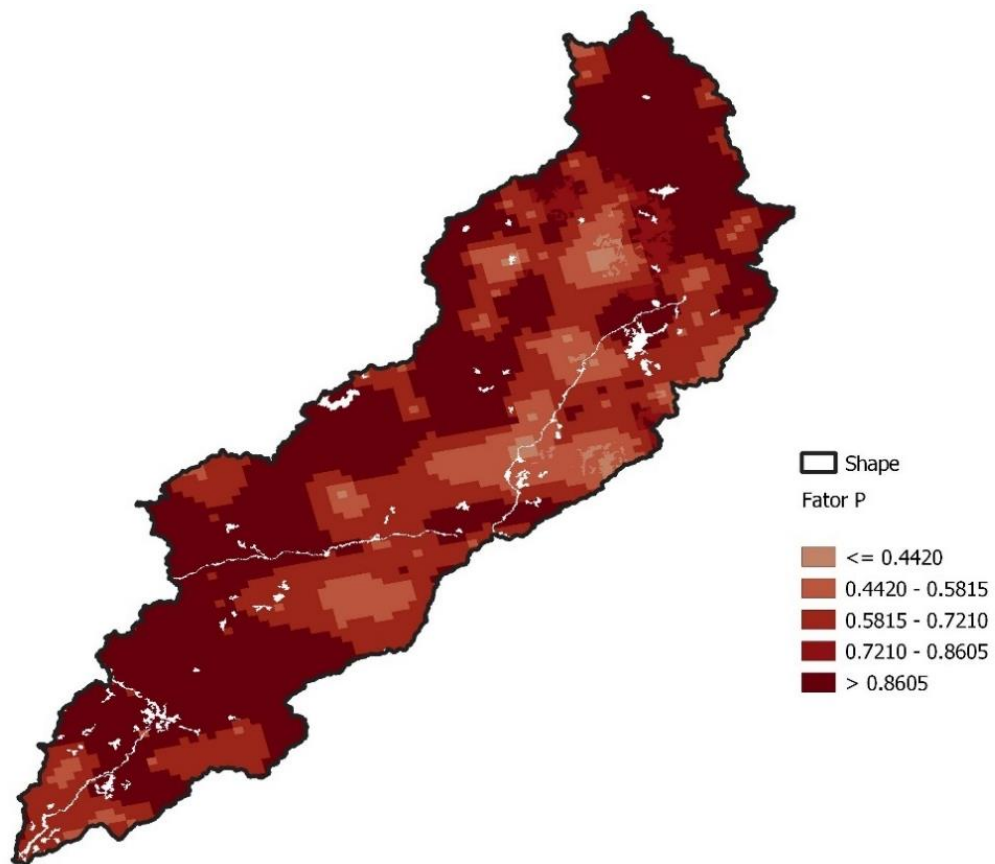


Fig. 30 - Fator de Conservação, P - (Panagos et al., 2015d)

O valor do fator de práticas de conservação obtido para a bacia hidrográfica do rio Tâmega foi de 0,835, face à estimativa do valor médio nacional de 0,918 (Panagos et al., 2015d).

#### 3.5.1.6. Carta da Erosão e Erosão Média na Bacia

Com os mapas de distribuição ao longo da bacia do Tâmega dos cinco fatores que intervêm na RUSLE e usando a calculadora de *raster* das ferramentas SIG produziu-se o Mapa de Erosão de Solo que se apresenta na (Fig. 31).

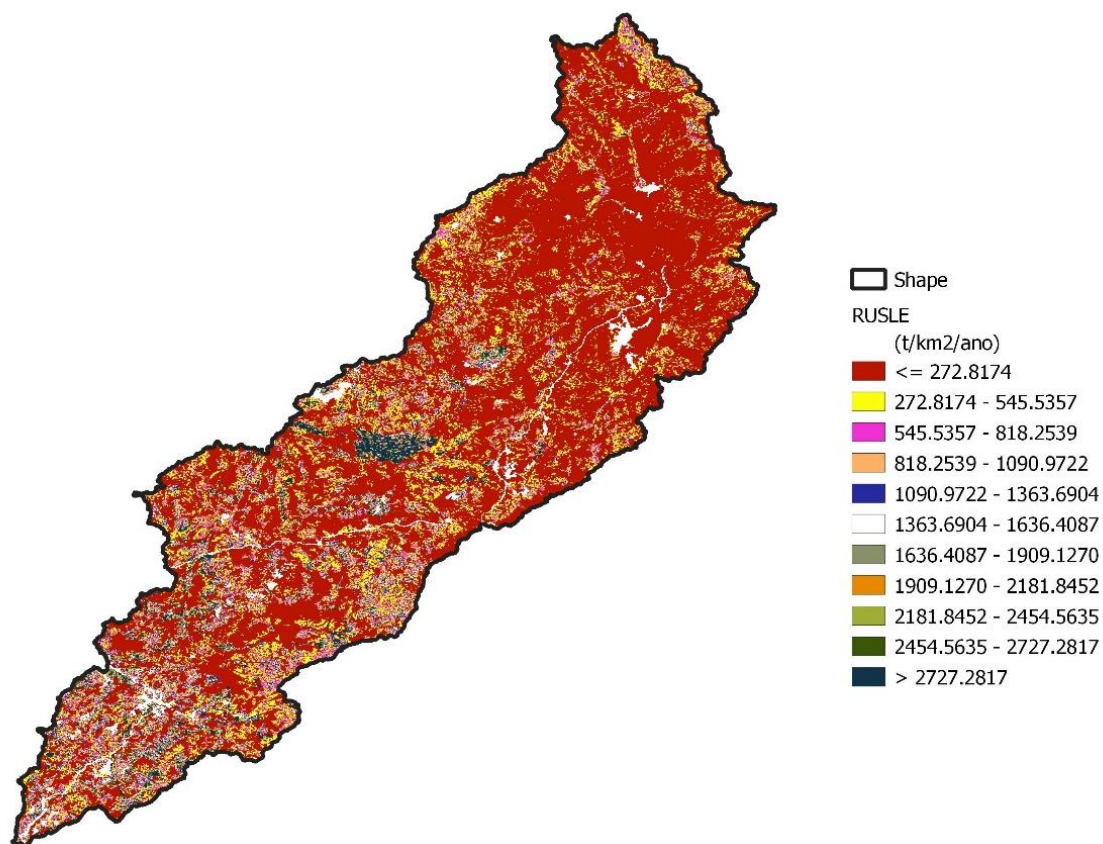


Fig. 31 - Classes de erosão

Os resultados médios de perda de solo obtidos pela RUSLE na bacia hidrográfica do rio Tâmega são apresentados na (Tabela 8), juntamente com os valores médios dos fatores que intervêm na fórmula RUSLE, e cuja foi anteriormente referida neste Subcapítulo.

Tabela 8 - Perda de solo na bacia do Tâmega obtidos através do Modelo RUSLE

| Descrição                    | QGIS - SIG | Unidades                             |
|------------------------------|------------|--------------------------------------|
| <b>Fator R</b>               | 838,850    | (MJ.mm/(ha.h.ano))                   |
| <b>Fator K</b>               | 0,028      | (t.ha.h/(ha.MJ.mm))                  |
| <b>Fator P</b>               | 0,835      | Adimensional                         |
| <b>Fator C</b>               | 0,095      | Adimensional                         |
| <b>Fator LS</b>              | 3,220      | Adimensional                         |
| <b>Perda de Solo (RUSLE)</b> | 6,066      | t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> |
|                              | 606,617    | t/ (km² ano)                         |

### 3.5.2. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Na (Tabela 9) apresentam-se os valores da Razão de Entrega de Sedimentos estimados para a bacia do Tâmega tendo em conta as diferentes formulações apresentadas no Subcapítulo 2.2.6., atenta a área da bacia hidrográfica, que é aproximadamente 3266 km<sup>2</sup>. Apresenta-se também nesta tabela o valor do SDR que foi estimado nos estudos realizados pela EDP no âmbito do projeto do aproveitamento hidroelétrico do Fridão (EDP, 2011).

Tabela 9 - Valores da Razão de Entrega de Sedimentos estimados para a bacia do Tâmega

| (Vanoni, 1975) | (Boyce, 1975) | (USDA, 1972) | (EDP, 2011) |
|----------------|---------------|--------------|-------------|
| SDR = 0,172    | SDR = 0,055   | SDR = 0,232  | SDR = 0,15  |

A produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Tâmega na secção da barragem do Torrão pode ser então determinada pelo produto de cada um dos SDR apresentados com o valor de Perda de Solo estimado no ponto anterior. Apresenta-se na (Fig. 32) a gama de valores obtidos, que varia entre 33,4 a 140,7 toneladas/km<sup>2</sup>/ano.

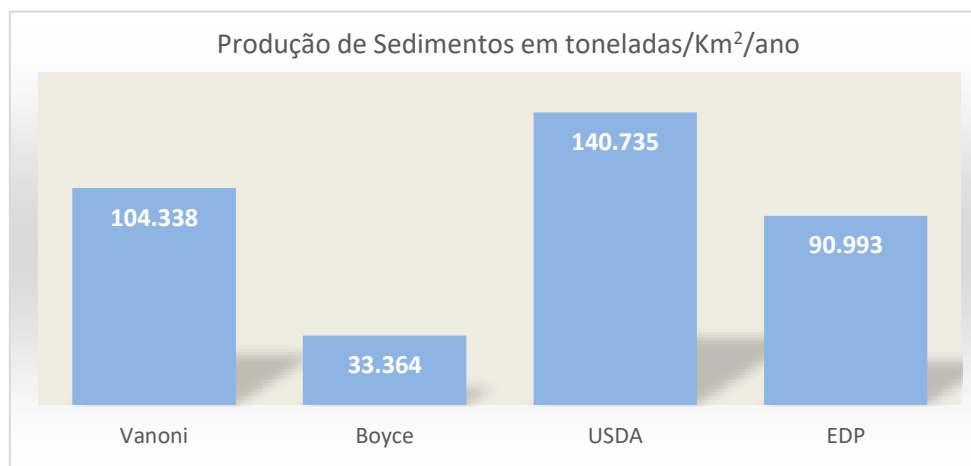


Fig. 32 - Valores de Produção de Sedimentos Média Anual na bacia do Tâmega

### 3.6. CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PELO MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA HEC-HMS

Neste capítulo apresenta-se uma estimativa do volume de sedimentos que pode afluir à albufeira da barragem do Torrão, utilizando para o efeito o modelo de simulação hidrológica HEC-HMS.

#### 3.6.1. MODELO DE PRECIPITAÇÃO ESCOAMENTO

O HEC-HMS permite realizar simulações de eventos ou simulações contínuas de longos períodos, englobando períodos de cheia e de estiagem. Esta característica só é possível devido a um conjunto de

modelos, formulações e equações que podem ser escolhidas para representar cada parte da fase terrestre do ciclo hidrológico (USACE-HEC, 2000).

O modelo precipitação escoamento neste caso de estudo foi calibrado e verificado para uma simulação contínua, com passo de tempo diário.

#### 3.6.1.1. Divisão em sub-bacias

Para a aplicação deste modelo de simulação hidrológica HEC-HMS na bacia hidrográfica do Tâmega, esta foi dividida em 25 sub-bacias, sendo cada uma delas constituída por duas superfícies de escoamento, correspondentes às zonas em que cada sub-bacia é dividida pela linha de água principal que a atravessa.

Na (Fig. 33) apresenta-se a divisão nessas sub-bacias, as quais foram geradas automaticamente através do Modelo Digital de Elevação (DEM).

O modelo permite determinar o escoamento gerado em cada sub-bacia, analisando em seguida a combinação e propagação dos mesmos, segundo o esquema concetual apresentado na (Fig. 34).

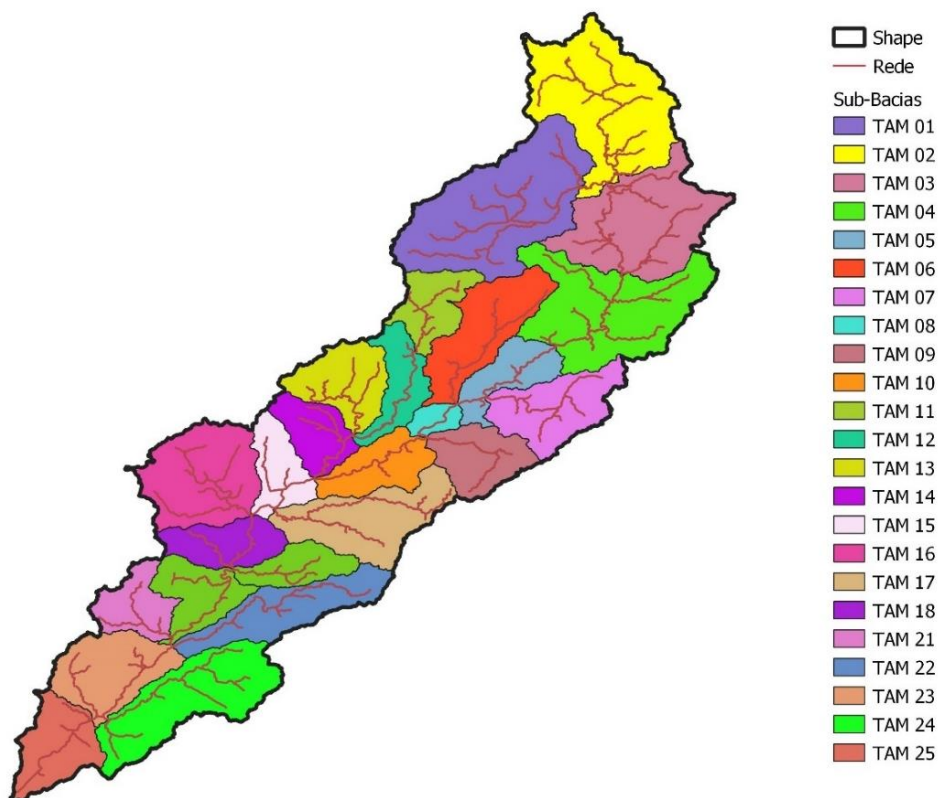


Fig. 33 - Divisão de Sub-Bacias

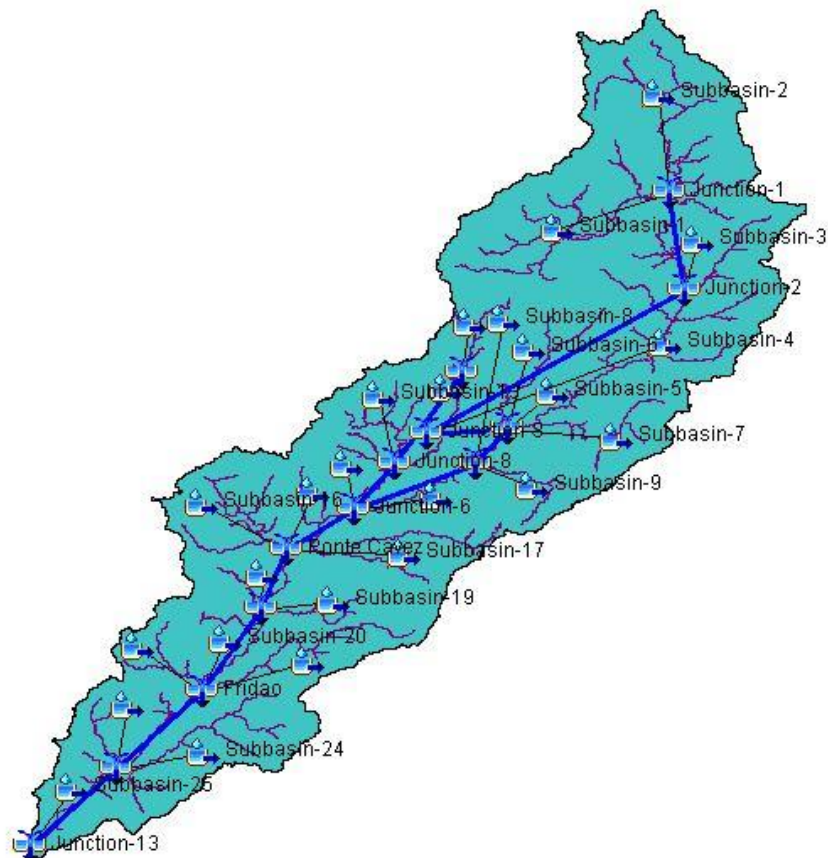


Fig. 34 - Modelo Conceitual da Bacia Hidrográfica do Tâmega

### 3.6.1.2. Modelo Meteorológico

Na definição do modelo meteorológico consideraram-se as séries de registos de precipitações diárias, relativas ao período compreendido entre 01/01/1980 e 01/01/1993 (13 anos), dos oito postos udométricos já referidos no Subcapítulo 3.4.3., que são: Alturas do Barroso, Amarante, Boticas, Chaves, Celorico de Basto, Cabeceiras de Basto, Lixa do Alvão e Travancas.

Para definir a distribuição espacial da precipitação ao longo da bacia recorreu-se ao método das áreas de influência, também conhecido por Método dos Polígonos de Thiessen ou Polígonos de Voronoi.

A construção das áreas de influência consiste na elaboração de uma rede de triângulos adjacentes, com vértices coincidentes com os postos udométricos. Nesta representação, deve garantir-se que a circunferência circunscrita a cada triângulo não contém nenhum posto – Rede de Delaunay. O polígono de Thiessen associado a um posto é formado pelas mediatrizes dos lados dos triângulos que têm o posto articulado como vértice. A interseção da área em análise com o respetivo polígono de Thiessen, resultará na área de influência (Hipólito e Vaz, 2017).

Na (Fig. 35) estão representadas as áreas de influência dos oito postos udométricos selecionados, obtidas com recurso a ferramentas SIG, através das opções de *Geometria Vetorial*, em *Polígonos de Voronoi* e no (Anexo 1) apresentam-se os valores das áreas de influência de cada posto em cada uma das subbacias.

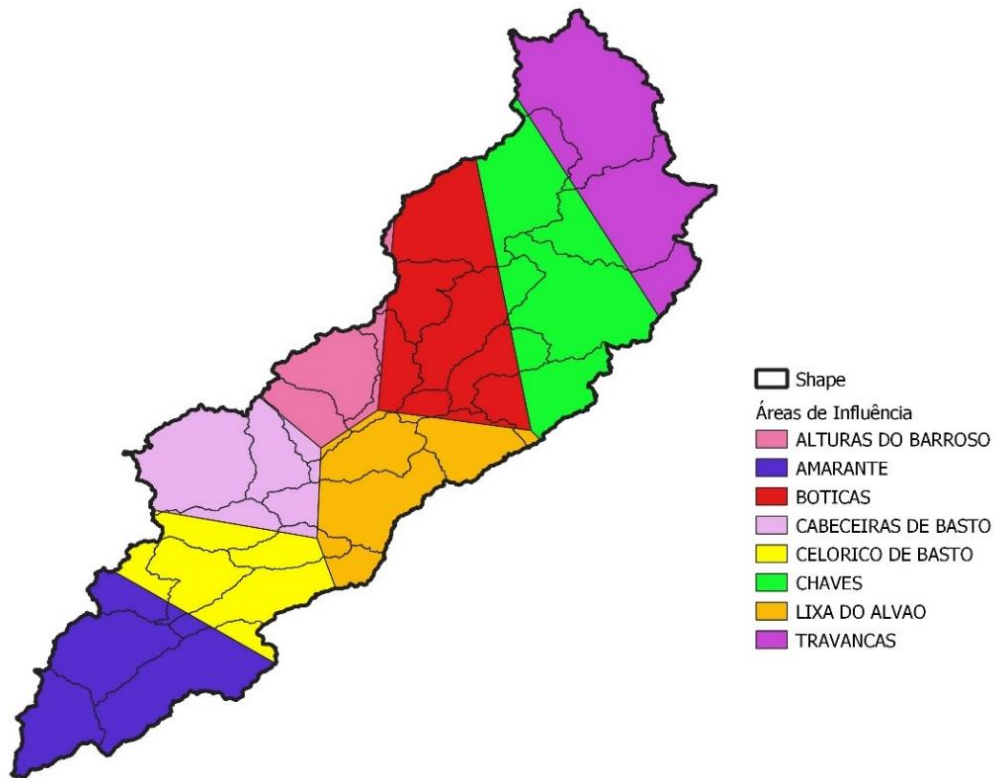


Fig. 35 - Áreas de Influência dos Postos Seleccionados na bacia do Tâmega

#### 3.6.1.3. Modelo de Cobertura - Método de Cobertura Simples/*Simple Canopy*

O Método de Cobertura Simples selecionado é uma representação simples da cobertura da vegetação. Dos métodos disponíveis no HEC-HMS para definir o Modelo de Cobertura, foi usado neste estudo o *Simple Canopy*.

A aplicação deste método passa por definir os seguintes parâmetros: condição inicial de armazenamento; armazenamento da cobertura, e; coeficiente de cultura.

A condição inicial de armazenamento é especificada como a percentagem de armazenamento da vegetação no início da simulação, tendo sido considerada nula.

O armazenamento da cobertura, por sua vez, representa a quantidade máxima de água que pode ser armazenada pela vegetação, antes de chegar à superfície e é especificada como uma altura efetiva de água.

O armazenamento de cobertura tem valores propostos por (Holberg, 2014), no guia da Universidade de Purdue, em correspondência com as Classes de Uso de Solo (Tabela 10). Na (Fig. 36) apresenta-se o mapa da bacia do Tâmega com a distribuição destas classes obtido a partir do CORINE Land Cover — *Copernicus Land Monitoring Service*.

Tabela 10 - Estimativa da quantidade de água em mm, retidas na interseção com a vegetação (Holberg, 2014)

| Classe de Uso de Solo                                        | Interceção da Vegetação - Armazenamento | Áreas              | Peso da Área | Média Ponderada do Armazenamento para a Bacia do Tâmega |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|--------------|---------------------------------------------------------|
|                                                              | (mm)                                    | (Km <sup>2</sup> ) | (%)          | (mm)                                                    |
| Vegetação Geral                                              | 1,27                                    | 1463,152           | 44,8         | 0,57                                                    |
| Pastos, Campos, Vegetação Rasteira e Árvores de Folha Caduca | 2,032                                   | 1127,054           | 34,5         | 0,70                                                    |
| Árvores Coníferas                                            | 2,54                                    | 517,816            | 15,9         | 0,40                                                    |
| Outras Áreas                                                 | -                                       | 157,967            | 4,8          | 0                                                       |

Obteve-se para o armazenamento de cobertura uma média ponderada de 1,67 mm para toda a área da bacia hidrográfica do Tâmega.

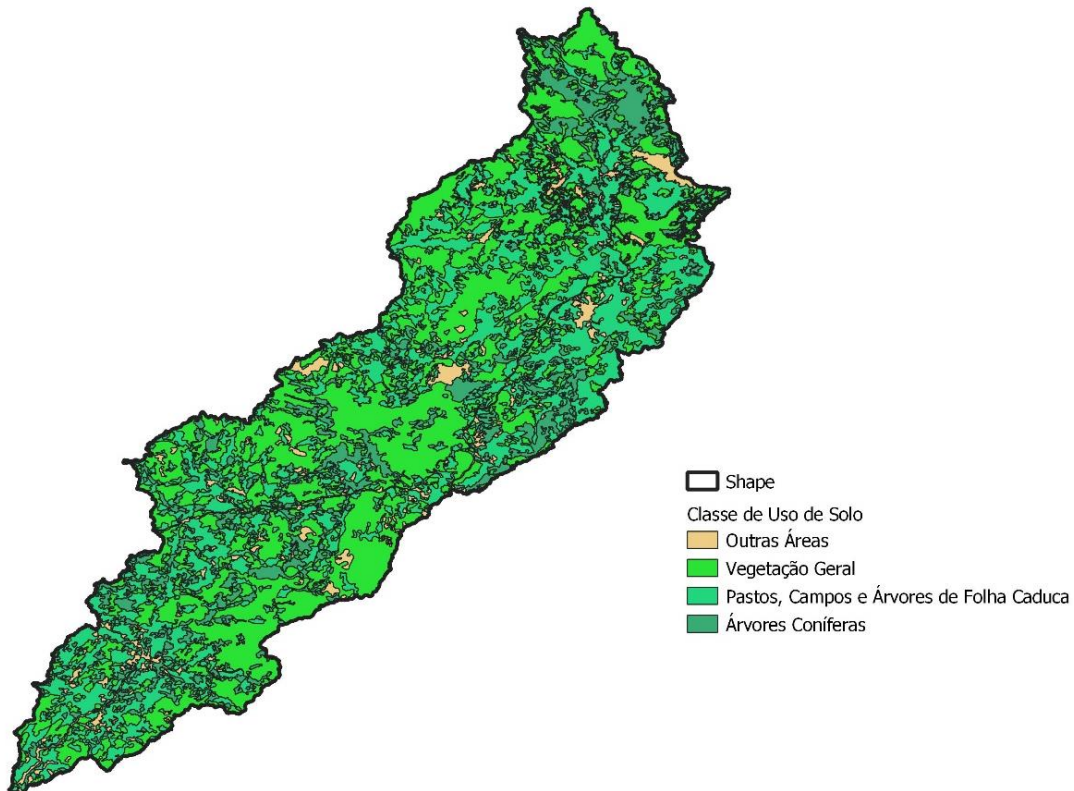


Fig. 36 - Classe de Uso de Solo – adaptadas de CLC 2018

Já o coeficiente de cultura,  $k_c$ , dependente de cada cultura, está relacionado com as datas de plantação ou sementeira, ritmos de desenvolvimento da cultura e duração do seu período vegetativo, e dependente também das condições climáticas e da frequência das precipitações ou das regas (Rodrigues et al., 2017). No manual do utilizador do HEC-HMS é sugerido o valor 1 para este coeficiente de cultura (Scharffenberg, 2016).

O modelo permite fazer uma configuração adicional, de forma a definir se a evaporação da água do armazenamento de cobertura e a extração da água do solo ocorrerão somente durante os períodos sem precipitação, ou em períodos com e sem precipitação, tendo-se considerado neste estudo a segunda opção.

#### 3.6.1.4. Modelo de Superfície - Método de Superfície Simples/*Simple Surface*

A aplicação deste método passa por definir os seguintes parâmetros: condição inicial de armazenamento; e armazenamento máximo.

A condição inicial de armazenamento é especificada como a percentagem de armazenamento da superfície no início da simulação, que neste estudo foi considerada nula.

O armazenamento máximo da superfície, por sua vez, representa a quantidade máxima de água que pode ser armazenada na superfície, antes de se gerar escoamento superficial. O armazenamento máximo tem valores propostos por (Holberg, 2014), no guia da Universidade de Purdue, em correspondência com os declives do terreno (em %), de acordo com a (Tabela 11). Na (Fig. 37) apresenta-se o mapa de declives da bacia do Tâmega obtido através do DEM.

Tabela 11 - Valores de armazenamento máximos de superfície associados aos declives do terreno (em %)

| Descrição                     | Declive | Armazenamento de Superfície | Média Ponderada do Armazenamento na Bacia do Tâmega |
|-------------------------------|---------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|
|                               | (%)     | (mm)                        | (mm)                                                |
| Área Pavimentada Impermeável  | NA      | 3,18-6,35                   | 9,56                                                |
| Terra plana e sulcada         | 0-5     | 50,8                        |                                                     |
| Declives Suaves a Moderadas   | 5-30    | 6,35-12,70                  |                                                     |
| Declives Moderadas a Íngremes | >30     | 1,02                        |                                                     |

Obteve-se para o armazenamento de superfície uma média ponderada de 9,56 mm para toda a área da bacia hidrográfica do Tâmega.

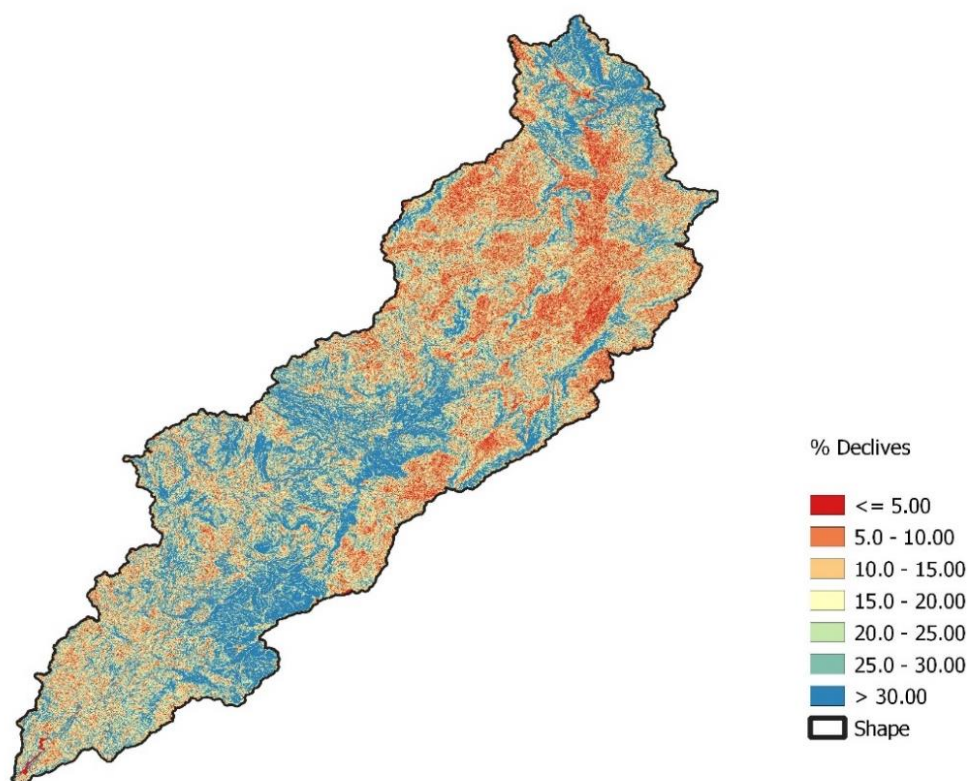


Fig. 37 - (%) Declives da bacia do Tâmega

#### 3.6.1.5. Modelo de Perdas - Método de *Deficit and Constant Loss*

Dos métodos disponíveis no HEC-HMS para definir o Modelo de Perdas, foi usado neste estudo o *Deficit and Constant Loss*.

A aplicação deste método passa por definir os seguintes parâmetros: Déficit inicial; Déficit máximo; Taxa Constante (associada às perdas); e percentagem de Impermeabilidade.

O déficit inicial é a quantidade de água que, no início da simulação, seria necessária para preencher a camada de solo até atingir o armazenamento máximo. Para estimar um valor de déficit inicial adequado, devem ser investigadas as condições antecedentes. A humidade média diária, a acumulação de precipitação diária, a temperatura média diária e a velocidade média diária do vento são alguns dos parâmetros a explorar para a definição do déficit inicial. Dada a dificuldade em obter estes parâmetros, neste estudo admitiu-se um valor de 15 mm para o déficit inicial, valor compreendido na gama de valores sugeridos no *Manual Technical Reference* do HEC-HMS (USACE-HEC, 2000).

O déficit máximo, por outro lado, especifica a quantidade total de água que a camada de solo pode conter. O déficit máximo refere-se ao quão mais seco um solo pode ficar após ser drenado por gravidade, evaporação e transpiração. É um parâmetro que pode ser estimado pela diferença entre o armazenamento de saturação e o armazenamento do ponto de emurchecimento de um solo, ao longo da profundidade de camada ativa assumida. O armazenamento por saturação refere-se à quantidade de humidade que pode ser mantida dentro de uma coluna de solo quando todas as bolhas de ar são forçadas para o exterior, sendo a porosidade efetiva um bom indicador para este armazenamento de saturação. Em contrapartida, o armazenamento do ponto de emurchecimento refere-se à quantidade de água que está tão fortemente ligada às partículas do solo que não pode ser evaporada ou transpirada. Em suma:

$$\text{Défice Máx.} = (\text{Armaz. de saturação} - \text{Armaz. P. de emur.}) \times \text{prof. de camada ativa} \quad (73)$$

$$\text{Armaz. de saturação} \approx \text{Porosidade Efetiva} \quad (74)$$

$$\text{prof. de camada ativa} \approx [609.6 - 920] \text{mm} \quad (75)$$

Em termos da profundidade de camada ativa, é sugerido pelo *Tutorial and Guides* do HEC-HMS (USACE, 2021), valores dentro do intervalo [609.6-920] mm, tendo sido considerado neste estudo o valor de 609.6 mm. Parâmetros como a Porosidade Efetiva, o Ponto de emurchecimento, o Défice Máximo e a Condutividade Hidráulica Saturada, podem ser estimados através da análise da textura superficial do solo, de acordo com a classificação do USDA (Rawls et al., 1983), exibidos na (Tabela 12).

Tabela 12 - Características dos solos propostas por(Rawls, Brakensiek e Miller, 1983).

| <i>Textura</i>               | <i>Porosidade Efetiva</i>            | <i>Ponto de Emurchecimento</i>       | <i>Défice Máximo</i> | <i>Condutividade Hidráulica Saturada</i> |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|
| (USDA)                       | (mm <sup>3</sup> / mm <sup>3</sup> ) | (mm <sup>3</sup> / mm <sup>3</sup> ) | (mm)                 | (mm/hr)                                  |
| Solo Franco Argiloso         | 0,31                                 | 0,2                                  | 67,06                | 1,016                                    |
| Solo argiloso arenoso        | 0,32                                 | 0,2                                  | 73,15                | 0,508                                    |
| Solo franco argiloso arenoso | 0,33                                 | 0,15                                 | 109,73               | 1,524                                    |
| Solo argiloso                | 0,39                                 | 0,27                                 | 73,15                | 0,254                                    |
| Solo arenoso franco          | 0,40                                 | 0,06                                 | 207,26               | 30,48                                    |
| Solo franco arenoso          | 0,41                                 | 0,1                                  | 188,98               | 10,16                                    |
| Solo arenoso                 | 0,42                                 | 0,03                                 | 237,74               | 116,84                                   |
| Solo argiloso siltoso        | 0,42                                 | 0,25                                 | 103,63               | 0,508                                    |
| Solo franco                  | 0,43                                 | 0,12                                 | 188,98               | 2,54                                     |
| Solo franco argiloso siltoso | 0,43                                 | 0,21                                 | 134,11               | 1,016                                    |
| Solo franco siltoso          | 0,49                                 | 0,13                                 | 219,46               | 7,62                                     |

Para analisar a textura do solo na área da bacia hidrográfica do Tâmega, foram estudados mapas de composição do solo quanto aos teores de argila (Fig. 38), silte (Fig. 39), areia (Fig. 40) e textura do solo (Fig. 41) na bacia, obtidos através da ESDAC – *European Soil Data Center* (Panagos et al., 2015e).

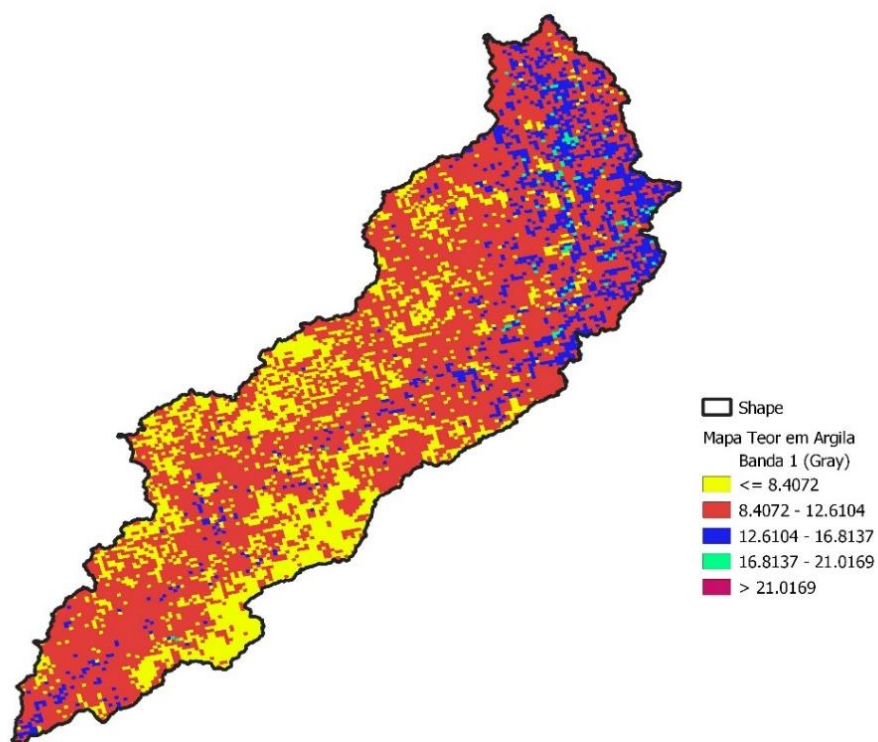


Fig. 38 - Mapa Representativo da % do Teor em Argila na Bacia Hidrográfica do Tâmega

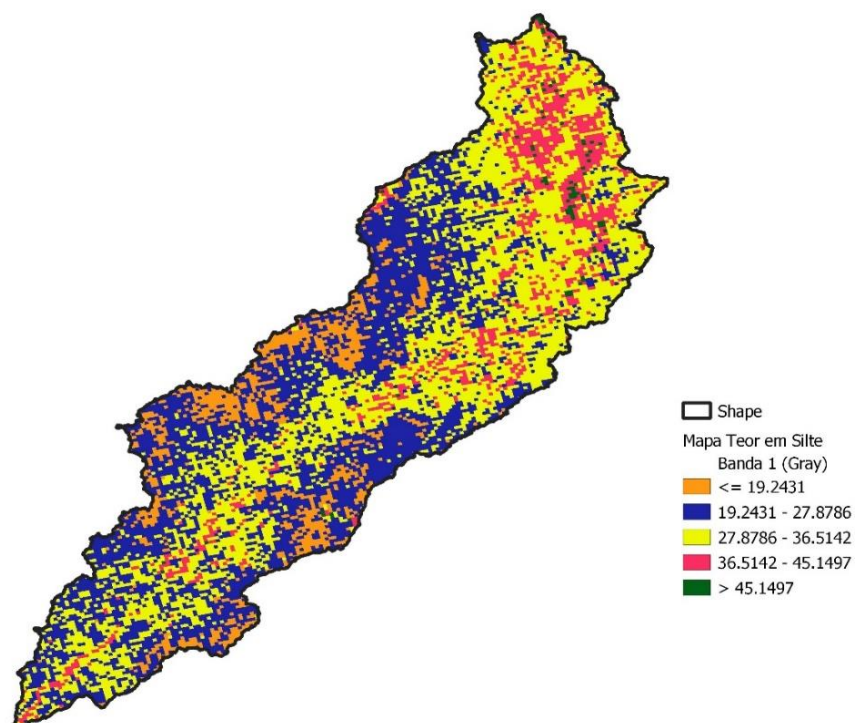


Fig. 39 - Mapa Representativo da % do Teor em Silte na Bacia Hidrográfica do Tâmega

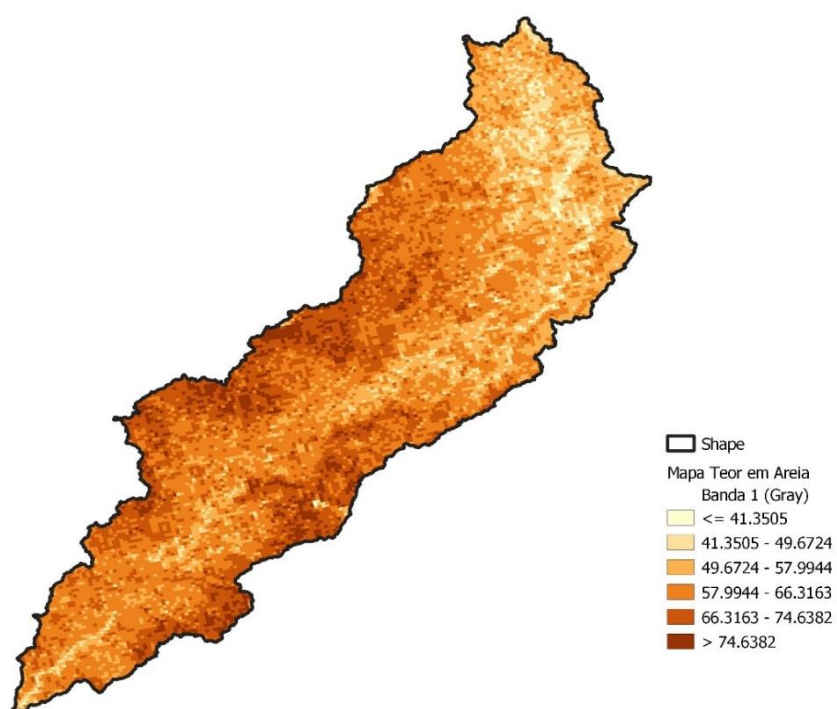


Fig. 40 - Mapa Representativo da % do Teor em Areia na Bacia Hidrográfica do Tâmega

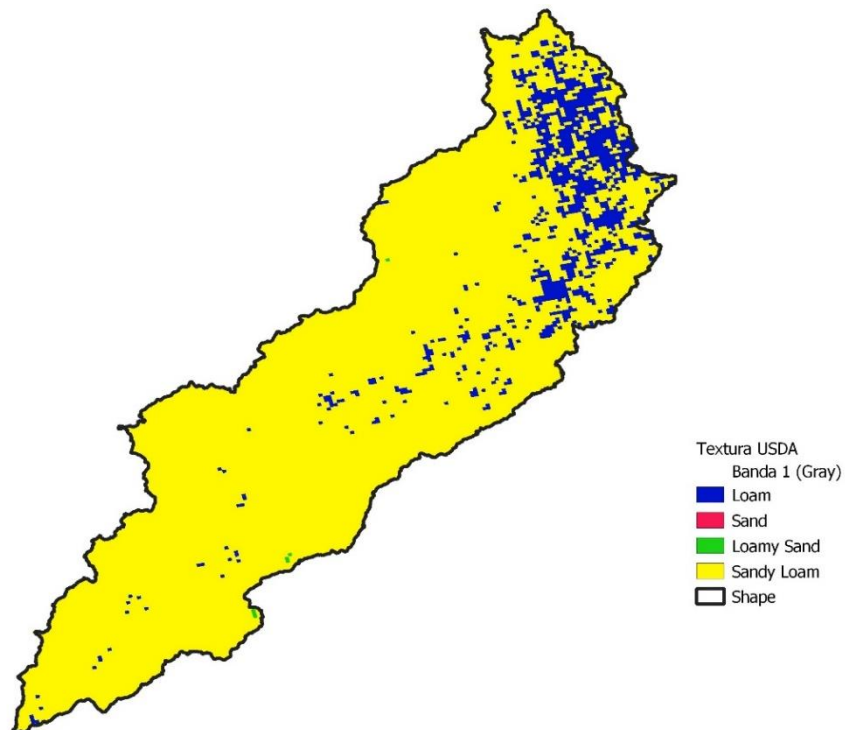


Fig. 41 - Mapa Textura de Solo na Bacia Hidrográfica do Tâmega

Segundo o mapa da (Fig. 38), a percentagem do Teor em Argila é relativamente baixa, com uma média aproximada de 10% ao longo da bacia hidrográfica do Tâmega. As maiores percentagens de teor em argila, contidas num intervalo [12,6-16,8] % acentuam-se nas áreas em território espanhol e na Veiga de Chaves, surgindo ainda nalgumas zonas ao longo da linha de água principal.

A percentagem do Teor em Silte, apresentada no mapa da (Fig. 39), embora não apresente valores muito elevados, chega a ter uma média aproximada de 28%, mais do que o dobro da percentagem do Teor em Argila. A distribuição é semelhante à do teor em argila apresentada no mapa da (Fig. 38), com as maiores percentagens de silte - intervalos de [36,5-45,2] % e de [27,9-36,5] % - a surgir em território espanhol e na Veiga de Chaves. Esta presença mais acentuada de silte também é notória ao longo da linha de água principal, sendo depois esta frequência dissipada à medida que se verifica o afastamento do curso principal e com o aproximamento dos limites de contorno da bacia hidrográfica.

A percentagem do Teor em Areia, apresentada no mapa da (Fig. 40), é a que apresenta os maiores valores, com uma média aproximada de 62% na bacia do rio Tâmega. As percentagens mais elevadas de teor em areia, superiores a 74,6% e contidas em intervalos de [66,3-74,6] %, encontram-se nas zonas de cabeceira e dos limites de contorno da bacia hidrográfica. O teor de areia vai, entretanto, diminuindo, à medida do aproximamento do curso principal. Na Veiga de Chaves e nas áreas em território espanhol, são registados os menores teores em areia, com valores inferiores a 50%.

No mapa da (Fig. 41) apresenta-se a distribuição da textura do solo na bacia do Tâmega de acordo com a classificação adotada pelo USDA. Verifica-se que aproximadamente 90% da área total da bacia apresenta um solo do tipo franco arenoso, sendo a restante percentagem referente a solo típico franco, com cerca de 9%, e ao solo tipo arenoso franco, com uma pequena fração, inferior a 1%.

Na (Tabela 13) apresentam-se os correspondentes valores da taxa constante e déficit máximo na bacia hidrográfica de estudo.

Tabela 13 - Dados referentes à Textura de Solo na Bacia do Tâmega

| Textura                    | Taxa Constante | Défice Máximo | Área               | Peso        | Média Ponderada da Taxa Constante na Bacia do Tâmega | Média Ponderada do Déficit Máximo na Bacia do Tâmega |
|----------------------------|----------------|---------------|--------------------|-------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| USDA                       | (mm/hr)        | (mm)          | (Km <sup>2</sup> ) | (%)         | (mm/hr)                                              | (mm)                                                 |
| <i>Solo franco</i>         | 2,54           | 188,98        | 299,5              | 9,18%       | 0,23                                                 | 17,35                                                |
| <i>Solo arenoso franco</i> | 30,48          | 207,26        | 1,75               | 0,05%       | 0,02                                                 | 0,10                                                 |
| <i>Solo franco arenoso</i> | 10,16          | 188,98        | 2961,75            | 90,77%      | 9,22                                                 | 171,54                                               |
| Total                      |                |               | <b>3263</b>        | <b>100%</b> | <b>9,47</b>                                          | <b>188,99</b>                                        |

Obteve-se para a Taxa Constante uma média ponderada de 9,47 mm/hr e para o Déficit Máximo, uma média ponderada de 188,99 mm para toda a área da bacia hidrográfica do Tâmega.

No que diz respeito à percentagem de impermeabilidade de solo, esta foi definida de acordo com as classes de uso de solo definidas pelo CORINE Land Cover — *Copernicus Land Monitoring Service*.

Os valores de percentagem de impermeabilidade associados às diferentes classes de uso de solo foram adaptados da literatura de (Exum et al., 2005) baseados no NLCD92 *Land Cover - National Land Cover Data*.

Na (Fig. 42) apresenta-se a distribuição na bacia do Tâmega das percentagens de impermeabilidade por classe de solo e na (Tabela 14) o valor da percentagem de impermeabilidade estimado para a bacia hidrográfica.

Tabela 14 - Classificação de Impermeabilidade conforme Classe de Uso de Solo na Bacia do Tâmega

| Classes de Uso de Solo                                                             | Impermeabilidade | Áreas              | Pesos       | Média Ponderada da Impermeabilidade na Bacia do Tâmega |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------------|--------------------------------------------------------|
|                                                                                    | (%)              | (Km <sup>2</sup> ) | (%)         | (%)                                                    |
| Superfícies Artificiais: Baixa Densidade Residencial, Minas, Comercial, Industrial | 0 - 1            | 7,61               | 0,23%       | 0,001                                                  |
| Florestas e Áreas Semi-Naturais                                                    | 5 - 9            | 2036,5             | 62,41%      | 4,369                                                  |
| Áreas Agrícolas: Pasto, Campos de Cultivo Diverso                                  | 2 - 5            | 1135,5             | 34,80%      | 1,218                                                  |
| Corpos de Água                                                                     | 42 - 62          | 83,34              | 2,55%       | 1,326                                                  |
|                                                                                    | Total            | <b>3263</b>        | <b>100%</b> | <b>6,914</b>                                           |

Obteve-se para a percentagem de impermeabilidade uma média ponderada de 6,914% para toda a área da bacia hidrográfica do Tâmega.

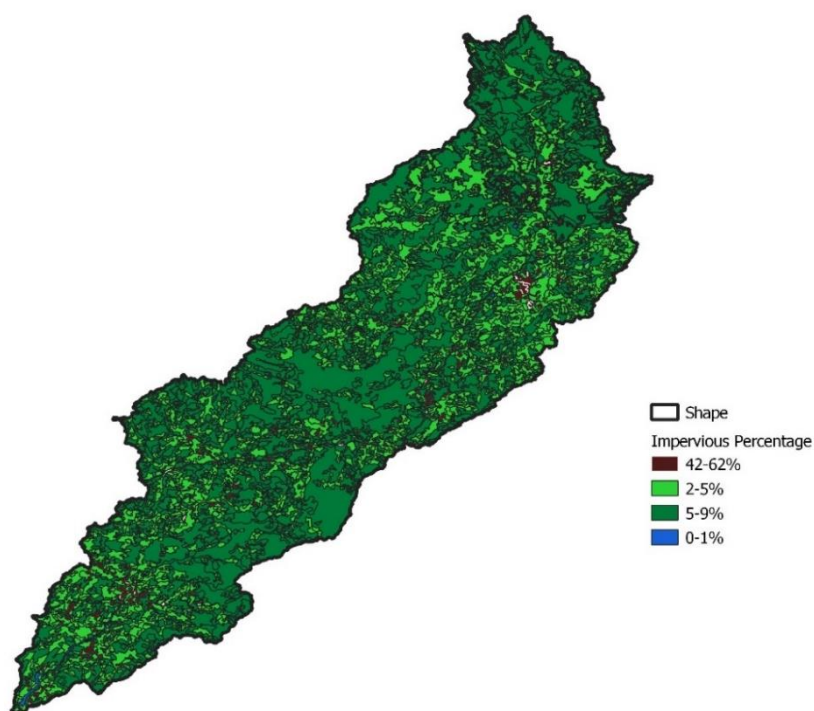


Fig. 42 - Distribuição da % de Impermeabilidade por classe de solo na bacia do Tâmega

#### 3.6.1.6. Modelo de Transformação Precipitação Escoamento – Método da Onda Cinemática/*Kinematic Wave*

Neste estudo o método usado no modelo de transformação precipitação escoamento foi o da onda cinemática.

Na utilização do Método da Onda Cinemática pelo HEC-HMS, é necessário definir os parâmetros referentes às características do canal e das superfícies de escoamento de cada uma das sub-bacias. As superfícies de escoamento são assimiladas a canais planos definidos pelo comprimento, inclinação e coeficiente de rugosidade, enquanto os canais coletores são caracterizados pelo comprimento, secção transversal, inclinação e coeficiente de rugosidade. A área associada a cada sub-bacia é também um fator exigido, bem como as percentagens em que esta se divide pelas duas superfícies de escoamento.

Os parâmetros referidos para as 25 sub-bacias que constituem o modelo são os que constam no (Anexo 2).

#### 3.6.1.7. Modelo de Escoamento Base – Método *Constant Monthly Baseflow*

O método adotado para o modelo de escoamento base foi o *Constant Monthly Baseflow*, que permite a especificação de um escoamento base constante para cada mês do ano.

Para estimar o escoamento base mensal do período selecionado, foram usadas as curvas de caudais médios diários classificados de cada mês observados nas estações udométricas de Ponte Cavez e Fridão. Para evitar a sobrestimação dos valores a usar para o escoamento base, foram desprezados os valores dessas curvas que igualam ou excedem o caudal cuja frequência de ocorrência é de 5%. No gráfico da (Fig. 43) são apresentados os valores específicos dos caudais de base mensais obtidos para a bacia do Tâmega e no (Anexo 3) os valores considerados em cada sub-bacia.

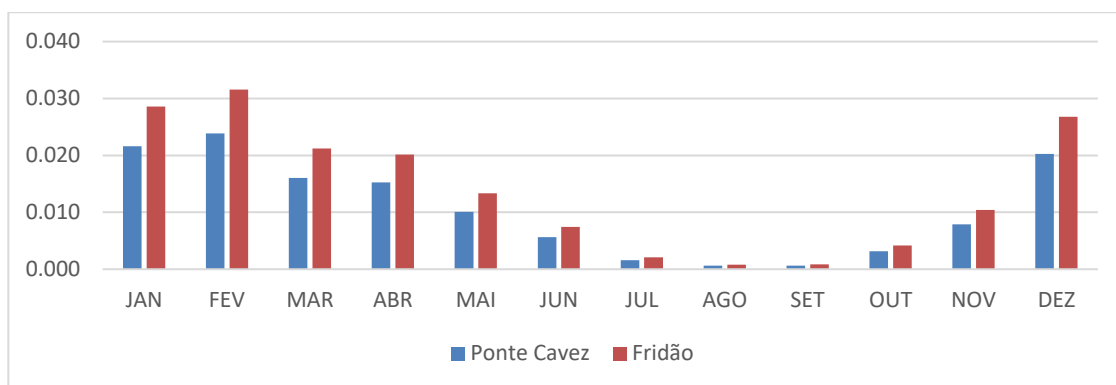


Fig. 43 - Valores de Caudal Base Mensais específicos usados no modelo

#### 3.6.1.8. Modelo de Propagação – Método de *Muskingum-Cunge*

O método selecionado para o Modelo de Propagação do escoamento ao longo das linhas de água foi o de *Muskingum-Cunge*, que considera o fluxo de entrada igual ao fluxo de saída, o que equivale a assumir uma condição inicial de estado estacionário. Neste método é necessário introduzir no modelo o comprimento, a inclinação, o coeficiente de rugosidade de *Manning* médio das linhas de água em estudo e a definição geométrica das secções transversais representativas dessas mesmas linhas de água.

É também necessário especificar um fluxo ou uma celeridade de referência. Esta escolha depende das propriedades físicas do canal ou do tipo de simulação em questão (evento ou contínua). Ponce, em 1983 referiu que o fluxo ou a celeridade de referência podem basear-se nos valores médios do hidrograma em discussão, ou seja, um valor entre o escoamento base e o de pico. No *HEC-HMS Tutorials and Guides* (USACE, 2021) refere-se que a utilização da celeridade de referência com um valor próximo de 1,5 metros/segundo é adequada para a maioria das aplicações.

No (Anexo 4) apresentam-se os parâmetros considerados na aplicação do método de *Muskingum-Cunge* nos 12 troços em que foi dividido o rio Tâmega.

#### 3.6.1.9. Calibração e Verificação do Modelo Hidrológico

Após a definição do modelo de simulação hidrológica, procedeu-se à sua calibração e verificação, através de processos iterativos, tendo como principal finalidade a otimização da relação entre os valores do caudal simulado e os valores de caudal registados na estação hidrométrica do Fridão.

Conforme foi já referido, a precipitação utilizada na modelação hidrológica refere-se a um período de 13 anos, de 1 de janeiro de 1980 a 1 de janeiro de 1993, período para o qual existem registos de caudal médio diário na estação hidrométrica de Fridão.

A calibração pode ser entendida como um ajuste dos parâmetros do modelo, de forma a melhorar a concordância entre os resultados das simulações e os dados observados. O processo de tentativa-erro para testar os diferentes valores dos parâmetros intervenientes na definição do modelo e nos métodos que o influenciam, é a forma de calibração mais evidente.

Importa, no entanto, referir que uma baixa performance do modelo pode estar relacionada com os modelos de cálculo usados ou as diferentes combinações destes. Outro aspeto que importa ter em consideração no caso de baixas performances do modelo é a qualidade dos dados de base utilizados,

nomeadamente as precipitações e os caudais. Na (Fig. 44) apresenta-se um esquema que representa as várias etapas da calibração

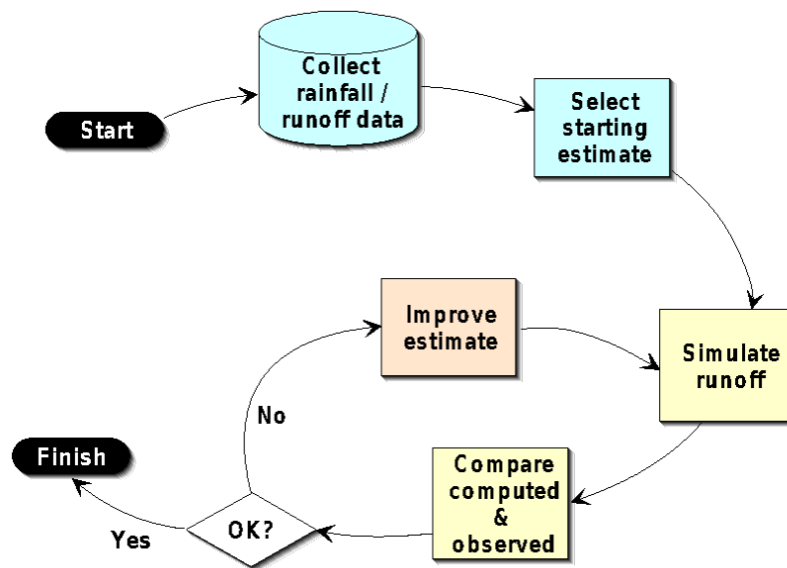


Fig. 44 - Esquema do procedimento de calibração, (USACE, 2021)

Tendo sido já analisada a qualidade dos dados de base no Subcapítulo 3.4. e, tendo em conta que os métodos de cálculo utilizados tiveram a sua seleção condicionada pelo tipo de simulação em questão (contínua) e pelos dados disponíveis, a calibração neste estudo foi então concretizada através do método de tentativa-erro, procedendo-se ao ajuste de um dos parâmetros que intervém no Modelo de Perdas, tendo sido adotado o *Deficit and Constant Method*.

Conforme já referido, os parâmetros que definem o *Deficit and Constant Method* são: o Défice inicial; o Défice máximo; a Taxa Constante; e a percentagem de Impermeabilidade. Destes, apenas foi calibrada a Taxa Constante, uma vez que é o parâmetro que apresenta um impacto mais significativo nos resultados da simulação.

Relativamente à Taxa Constante, constatou-se que o valor de 9,47 mm/hr estimado anteriormente (ver 3.6.1.5.) com base na condutividade hidráulica, conduzia a perdas muito elevadas, como se pode verificar na (Fig. 45), onde, a título de exemplo, se apresentam os resultados da simulação relativa à sub-bacia TAM01.

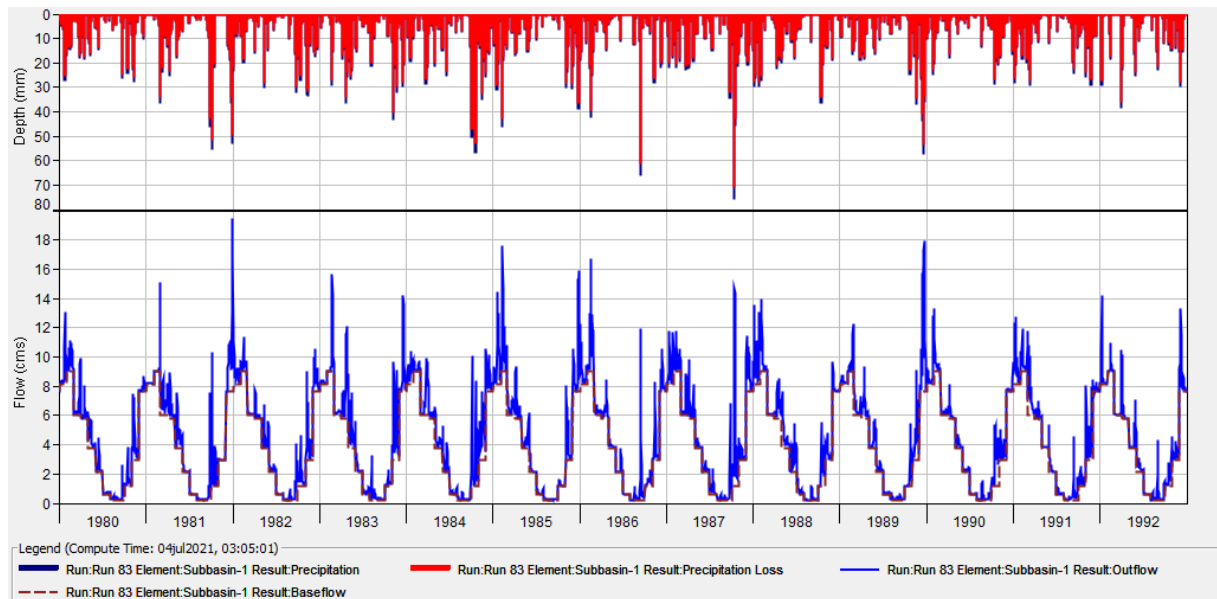


Fig. 45 - Simulação Hidrológica na Sub-bacia TAM01 com “Taxa Constante” = 9.47mm/hr

Na realidade, de acordo com a (Fig. 45), pôde verificar-se que, dessa forma, que as perdas de precipitação do modelo, representadas no gráfico a cor vermelha, reduziam praticamente a precipitação útil a valores nulos e, conseqüentemente o escoamento superficial a valores muito reduzidos.

Em consequência, foram testados vários valores para este parâmetro dentro da gama inferior ao valor estimado, tendo-se adotado o valor apresentado na (Tabela 15):

Tabela 15 - Valores do parâmetro “Taxa Constante” considerada no Modelo de Perdas

| “Taxa Constante” no Método <i>Deficit and Constant Method</i> |                                    |                                 |                      |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| <i>Taxa Constante</i>                                         | <i>Valor inicialmente estimado</i> | <i>Gama de valores testados</i> | <i>Valor Adotado</i> |
| <i>(mm/hr)</i>                                                | 9,47                               | 1-5                             | 1,3                  |

Na (Fig. 46) onde, a título de exemplo, se apresentam os resultados da simulação hidrológica relativa à sub-bacia TAM01, o parâmetro da Taxa Constante reduziu de 9,47 mm/hr para 1,3 mm/hr, diminuindo assim as perdas, que se verificavam muito elevadas na (Fig. 45). O valor de 1,3 mm/hr foi atingido por tentativa-erro, afinando este valor adotado com a eficiência do modelo, analisada de seguida.

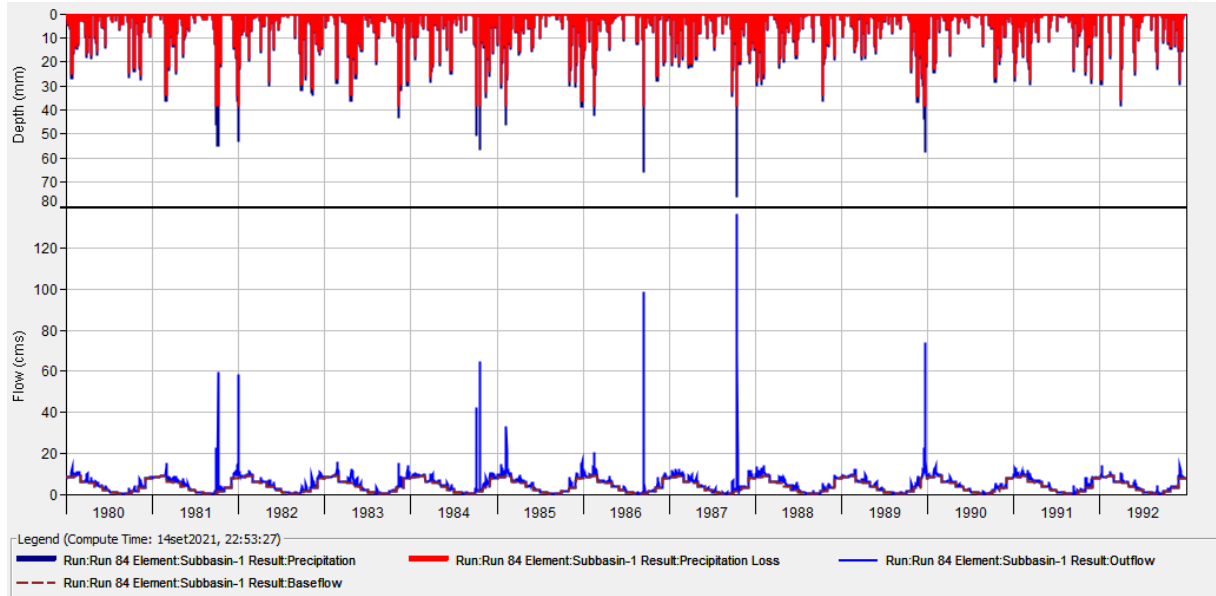


Fig. 46 - Simulação Hidrológica na Sub-bacia TAM01 com “Taxa Constante” = 1.3 mm/hr

A eficiência do modelo foi avaliada através de três descritores estatísticos: a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e o *BIAS* percentual ( $\delta b$ ).

O coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE – *Nash-Sutcliffe Efficiency*) é provavelmente o coeficiente adimensional mais utilizado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos (Legate e McCabe Jr., 1999). Este coeficiente pode ser definido como uma estatística normalizada que compara a grandeza relativa da variância residual com a variância dos dados medidos (Nash e Sutcliffe, 1970) e varia entre menos infinito e 1. Na situação de um modelo perfeito, com uma variância do erro de estimativa igual a zero, a eficiência Nash-Sutcliffe resultante seria igual a 1 (NSE = 1). No caso de uma série temporal modelada com uma variância do erro de estimativa que é significativamente maior do que a variância das observações, o NSE torna-se negativo. Para a aplicação de NSE em procedimentos de regressão, a eficiência de Nash-Sutcliffe aproxima-se do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), variando assim entre 0 e 1.

Em relação à raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error* ou RSR), esta é um índice muito utilizado para avaliar modelos hidrológicos (Moriassi et al., 2007). Valores reduzidos de RMSE estão associados a menores erros, sendo que o valor nulo representa um modelo que se ajusta perfeitamente aos dados medidos.

Por fim, o desvio percentual *PBIAS* (*Percent Bias*) é frequentemente utilizado para avaliar a tendência de subestimação ou sobrestimação dos modelos, ou seja, indica se os valores simulados tendem a ser maiores ou menores do que os valores observados.

As equações destes descritores estatísticos representam-se da seguinte forma:

*Eficiência de Nash-Sutcliffe*

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \delta)^2} \quad (76)$$

*RMSE - Root Mean Square Error*

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (77)$$

*Desvio percentual PBIAS*

$$PBIAS = \frac{\delta - \varphi}{\delta} \times 100\% \quad (78)$$

em que  $O_i$  corresponde ao caudal observado;  $P_i$  corresponde ao caudal obtido por simulação através do modelo,  $\delta$  corresponde ao caudal médio observado no período de simulação;  $\varphi$  corresponde ao caudal médio simulado no período de simulação e  $n$  corresponde ao número de dados observados/simulado, considerado no período de simulação.

De acordo com (Moriassi et al., 2007), a performance do modelo pode ser classificada com os critérios definidos da (Tabela 16).

Tabela 16 - Performance do Modelo

| Performance    | $R^2$                  | $NSE$                  | $RSR$                  | $PBIAS$                      |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| Muito Boa      | $0,65 < R^2 \leq 1$    | $0,65 < NSE \leq 1$    | $0 < RSR \leq 0,60$    | $PBIAS < \pm 15$             |
| Boa            | $0,55 < R^2 \leq 0,65$ | $0,55 < NSE \leq 0,65$ | $0,60 < RSR \leq 0,70$ | $\pm 15 < PBIAS \leq \pm 20$ |
| Satisfatória   | $0,40 < R^2 \leq 0,55$ | $0,40 < NSE \leq 0,55$ | $0,70 < RSR \leq 0,80$ | $\pm 20 < PBIAS \leq \pm 30$ |
| Insatisfatória | $R^2 \leq 0,40$        | $NSE \leq 0,40$        | $RSR > 0,80$           | $PBIAS \geq \pm 30$          |

Aplicando os referidos descritores ao modelo definido para a bacia do Tâmega e considerando o valor adotado para a Taxa Constante, obtém-se os valores apresentados na (Tabela 17).

Tabela 17 - Performance do Modelo segundo os descritores NSE, RMSE e %Bias

| <i>"Taxa Constante" no Método Deficit and Constant Method</i> |                      |            |                     |               |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|------------|---------------------|---------------|
| <i>Taxa Constante</i>                                         | <i>Valor Adotado</i> | <i>NSE</i> | <i>RMSE Std.Dev</i> | <i>% Bias</i> |
| <b>(mm/hr)</b>                                                | 1,3                  | 0,45       | 0,7                 | -4,99 %       |

Comparando estes valores com os da (Tabela 16) conclui-se que o modelo tem uma performance satisfatória, segundo o indicador NSE; boa, segundo o RSR; e muito boa, segundo o PBIAS.

No gráfico representado na (Fig. 47), apresentam-se os hidrogramas simulados e observados na secção da estação hidrométrica de Fridão. Os resultados obtidos na calibração permitiram concluir que o modelo hidrológico definido está relativamente bem calibrado. De notar, ainda assim, que alguns valores extremos de caudal simulados não alcançaram os picos que foram realmente registados.

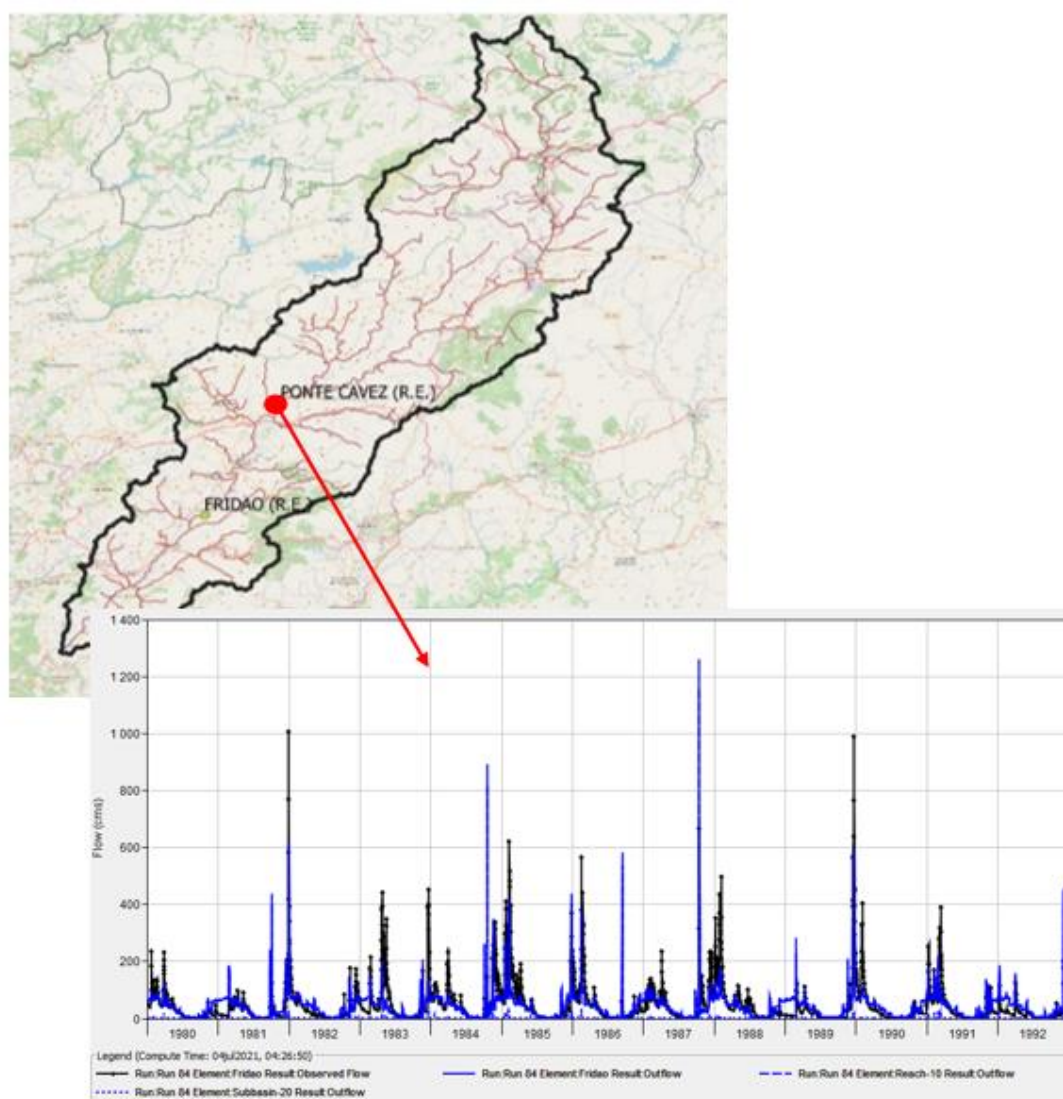


Fig. 47 - Caudais simulados (azul) vs Caudais observados na estação hidrométrica Fridão (negro)

Na (Tabela 18) resumem-se os valores adotados para os principais parâmetros requeridos para os diferentes modelos de cálculo usados:

Tabela 18 - Valores atribuídos aos parâmetros comuns às sub-bacias que constituem a bacia do Tâmega

| Modelo               | Métodos                   | Parâmetros                  | Valores atribuídos |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Modelo de Cobertura  | Simple Canopy             | <i>Initial Storage (mm)</i> | 0                  |
|                      |                           | <i>Maximum Storage (mm)</i> | 1,67               |
|                      |                           | <i>Crop Coefficient</i>     | 1                  |
| Modelo de Superfície | Simple Surface            | <i>Initial Storage (mm)</i> | 0                  |
|                      |                           | <i>Maximum Storage (mm)</i> | 9,56               |
| Modelo de Perdas     | Deficit and Constant Loss | <i>Initial Deficit (mm)</i> | 15                 |
|                      |                           | <i>Maximum Storage (mm)</i> | 188,99             |
|                      |                           | <i>Constant Rate (mm/h)</i> | 1,3                |
|                      |                           | <i>Impervious (%)</i>       | 6,91               |

### 3.6.2. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Para estimar a produção de sedimentos, o HEC-HMS dispõe de modelos para o cálculo da erosão do solo nas sub-bacias e também para simular os processos de sedimentação ao longo das linhas de água. Nos pontos seguintes apresenta-se a estimativa da produção de sedimentos na bacia do Tâmega recorrendo a esses modelos.

#### 3.6.2.1. Modelo de Erosão – Método MUSLE

O método usado no modelo de erosão foi o MUSLE, apresentada no Subcapítulo 2.3.7.

$$Sed = 11.8 (Q_{surf} \times q_{peak})^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \quad (60)$$

onde: *Sed* corresponde Perda de solo num determinado evento (toneladas);  $Q_{surf}$  corresponde ao volume do escoamento superficial gerado pelo evento de precipitação ( $m^3$ );  $q_{peak}$  corresponde ao valor do caudal de ponta gerado pelo evento de precipitação ( $m^3/s$ ); e os restantes parâmetros correspondem aos fatores de erodibilidade do solo (*K*), topográfico (*LS*), de cobertura do solo (*C*) e de práticas de conservação (*P*), já anteriormente objeto de consideração.

O HEC-HMS permite calcular a produção de sedimentos correspondente a um único evento de precipitação ou à simulação de múltiplos eventos ao longo de vários anos, que é o caso da simulação realizada neste estudo. Entretanto, o *software* considera que apenas alguns eventos de precipitação contribuem para a erosão da superfície. O limiar que define quais os eventos que contribuem para a produção de sedimentos (*Threshold*) corresponde a um valor de caudal, cujo valor deverá ser ajustado por calibração.

Os fatores K, LS, C e P intervenientes no Modelo MUSLE foram estimados com base nos mapas obtidos através do *European Soil Data Centre*, já analisados no Subcapítulo 3.5. No (Anexo 5) apresentam-se os valores destes fatores, que foram considerados em cada sub-bacia do modelo.

O modelo requer também a definição de uma curva granulométrica que caracterize a distribuição dos sedimentos por classes e subclasses de tamanho de grão (Anexo 6). Tendo por base os mapas de distribuição dos teores de areia, argila e silte nos solos da bacia do Tâmega apresentados no Subcapítulo 3.6.1.5. e também em estudos sobre a erosão hídrica em solos florestais de bacias portuguesas com características semelhantes à do Tâmega, onde a granulometria foi avaliada através de amostras de solos (Ferreira, 1996), foi definida a curva granulométrica apresentada no gráfico da (Fig. 48) que foi usada no modelo.

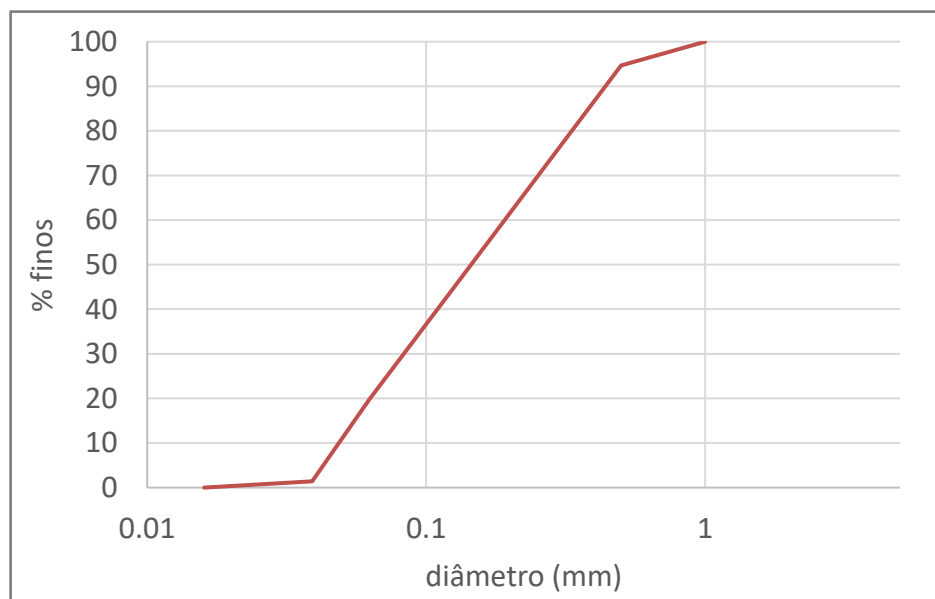


Fig. 48 - Curva Granulométrica dos solos da bacia do Tâmega

### 3.6.2.2. Modelo de Sedimentação – Método *Volume Ratio*

Dos métodos disponíveis no HEC-HMS para definir o modelo de sedimentação, foi escolhido o método do *Volume Ratio*. Para aplicação deste método, foi necessário definir a largura (*Bed Width*) e a altura (*Bed Depth*) da camada de sedimentos existente no leito das linhas de água.

O modelo considera a camada de sedimentos do leito dividida em dois níveis, sendo que o nível superior é definido a cada intervalo de tempo pelo produto do  $d_{90}$  dos sedimentos na camada superior e um fator designado por “*Active Layer Factor*”.

A aplicação do método *Volume Ratio* requer ainda a definição de uma curva granulométrica, que caracterize a distribuição dos sedimentos no leito por tamanho de grão, no início da simulação. Na falta de informação específica, a curva de referência utilizada neste estudo, apresentada no gráfico da (Fig. 49), foi adaptada do estudo de (Gibson e Cai, 2017).

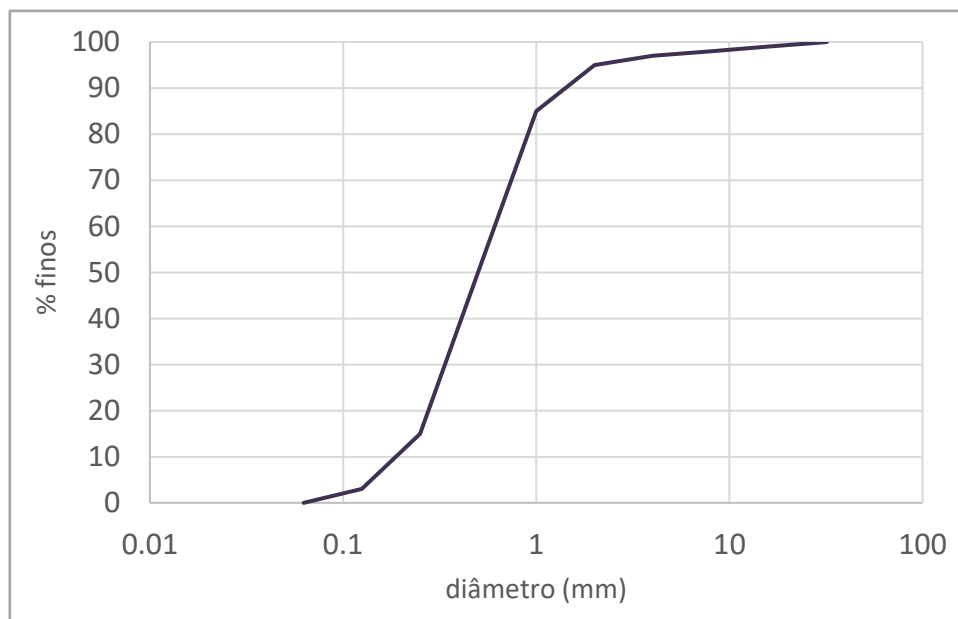


Fig. 49 - Curva Granulométrica de referência adotada para o leito das linhas de água, (Gibson e Cai, 2017)

### 3.6.2.3. Simulações para Análises de Sensibilidade

A estimativa da produção de sedimentos foi realizada para diferentes cenários de definição de alguns dos parâmetros que definem os Modelos de Erosão e Sedimentação. No modelo de erosão, o parâmetro testado foi o *Threshold*, enquanto no modelo de Sedimentação foram testadas variações dos valores atribuídos ao *Active Layer Factor*, à *Bed Depth* e também à curva granulométrica de referência (Tabela 19).

Nesta análise, todos os cenários propostos foram simulados com o mesmo modelo precipitação-escoamento e com os registos de precipitação definidos no Capítulo 3.

Tabela 19 - Parâmetros e métodos seleccionados para análises de sensibilidade

| Elemento      | Modelo                 | Método              | Parâmetro                  |
|---------------|------------------------|---------------------|----------------------------|
| Sub-bacia     | Modelo de Erosão       | MUSLE               | <i>Threshold</i>           |
| Linha de água | Modelo de Sedimentação | <i>Volume Ratio</i> | <i>Active Layer Factor</i> |
|               |                        |                     | <i>Bed Depth</i>           |
|               |                        |                     | Curva Granulométrica       |

▪ **Impacto do limiar que define os eventos que contribuem para a produção de sedimentos - *Threshold***

O limiar que define os eventos de precipitação que contribuem para a produção de sedimentos, *Threshold*, e, que no modelo se traduz o valor do caudal gerado pelos referidos eventos, foi testado para valores entre 10 m<sup>3</sup>/s e 30 m<sup>3</sup>/s.

Nas simulações realizadas, os restantes parâmetros testados mantiveram-se fixos (*Active Layer Factor* = 2, *Bed Depth* = 0,3 m, curva granulométrica de referência).

Na (Tabela 20) apresentam-se os valores de perda de solo na bacia do Tâmega obtidos através do HEC-HMS, para diferentes *Threshold* (modelo MUSLE) (ver também o Anexo 7), bem como os obtidos na aplicação do modelo RUSLE apresentada no Subcapítulo 3.5.1. Da sua análise verifica-se que é com um valor de *Threshold* igual a 10 m<sup>3</sup>/s que se obtiveram valores mais próximos de perda de solo pelas duas vias.

Tabela 20 - Valores de perda de solo obtidos através do HEC-HMS, para diferentes *Threshold*, (modelo MUSLE) e obtidos a partir do modelo RUSLE

| Perda De Solo Estimada Na bacia do Tâmega |                                    |                                    |
|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Via HEC-HMS (modelo MUSLE)                |                                    | Via modelo RUSLE                   |
| <i>Threshold</i> =10m <sup>3</sup> /s     | 515 toneladas/km <sup>2</sup> /ano | 606 toneladas/km <sup>2</sup> /ano |
| <i>Threshold</i> =15m <sup>3</sup> /s     | 308 toneladas/km <sup>2</sup> /ano |                                    |
| <i>Threshold</i> =20m <sup>3</sup> /s     | 194 toneladas/km <sup>2</sup> /ano |                                    |
| <i>Threshold</i> =30m <sup>3</sup> /s     | 86 toneladas/km <sup>2</sup> /ano  |                                    |

O gráfico da (Fig. 50) apresenta a correspondente variabilidade da produção de sedimentos, em toneladas/km<sup>2</sup>/ano para os diferentes *Threshold* assumidos, onde se pode verificar que existe uma gama variada de valores de produção de sedimentos, desde 98,7 toneladas/Km<sup>2</sup>/ano a 176,1 toneladas/Km<sup>2</sup>/ano, sendo os valores de produção de sedimentos tanto maiores quanto menor for o *Threshold*.

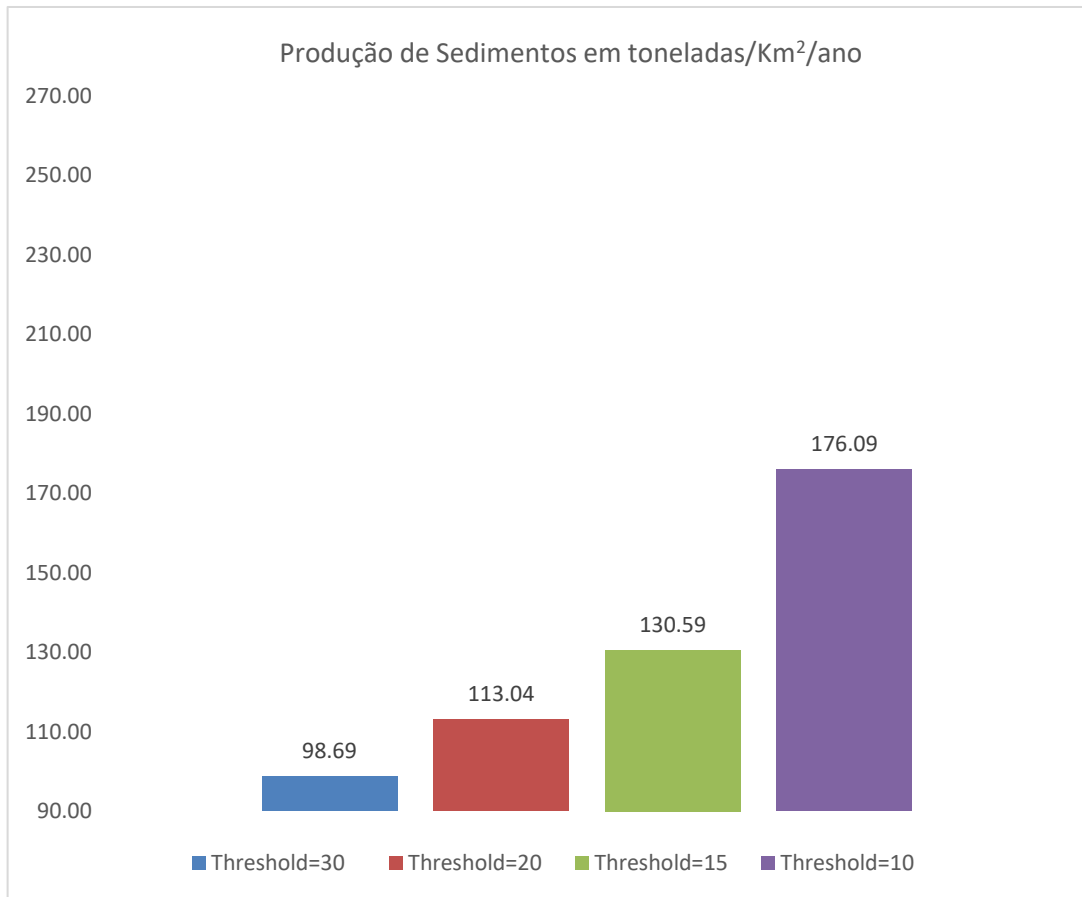


Fig. 50 - Produção de Sedimentos Média Anual na bacia do Tâmega, em toneladas/Km<sup>2</sup> /ano, para os diferentes *Threshold* testados

#### ▪ Impacto da espessura da camada ativa de sedimentos - *Active Layer Factor*

O *Active Layer Factor*, que representa a espessura da camada ativa do leito do rio em múltiplos do d<sub>90</sub> dos sedimentos, foi testado no intervalo de 1 a 3, tendo como referência o guia de aplicação do HEC-HMS, que recomenda a utilização de um valor de 2 (USACE, 2021).

Nas simulações realizadas, os restantes parâmetros testados mantiveram-se fixos (*Threshold* = 10 m<sup>3</sup>/s, *Bed Depth* = 0,3 m, curva granulométrica de referência).

Os resultados obtidos para as simulações considerando os diferentes *Active Layer Factors* são os observados no gráfico da (Fig. 51), onde se pode verificar que não há uma variação significativa na produção de sedimentos da bacia do Tâmega, face à aplicação dos diferentes *Active Layer Factores* considerados.

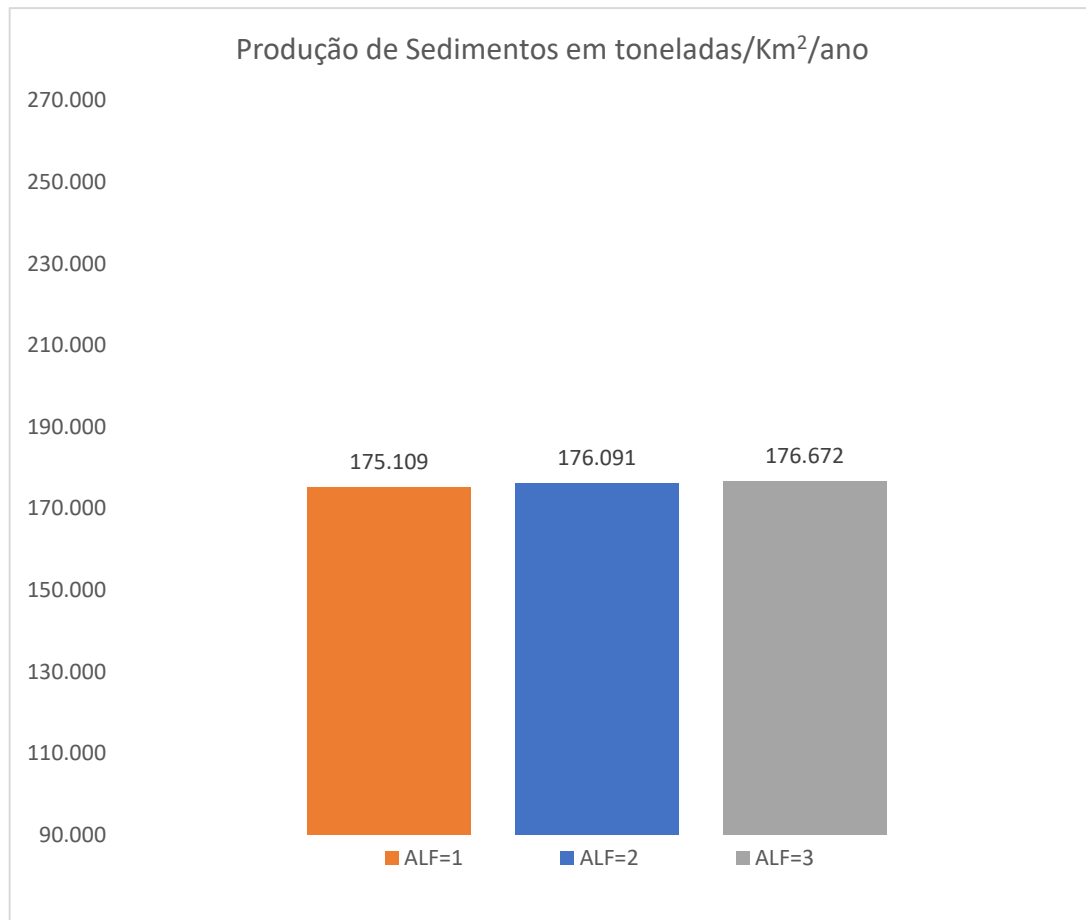


Fig. 51 - Produção de Sedimentos média anual na bacia do Tâmega, em toneladas/Km<sup>2</sup> /ano, para os diferentes *Active Layer Factors* testados

#### ▪ Impacto da altura da camada de sedimentos - *Bed Depth*

O parâmetro *Bed Depth*, que representa a profundidade máxima da camada de sedimentos no leito da linha de água, em períodos de tempo muito longos, foi testado para valores entre 0,10 m a 1,0 m.

Nas simulações realizadas, os restantes parâmetros testados mantiveram-se fixos (*Threshold* = 10 m<sup>3</sup>/s, *Active Layer Factor* = 2, curva granulométrica de referência)

Os resultados das simulações para diferentes *Bed Depth*, em termos de valores de produção de sedimentos na bacia do Tâmega, podem ser observados no gráfico da (Fig. 52), onde se pode verificar que existe uma gama variada de valores produção de sedimentos, desde 156,5 toneladas/Km<sup>2</sup>/ano a 264,1 toneladas/Km<sup>2</sup>/ano, sendo os valores de produção de sedimentos tanto maiores quanto maior for a *Bed Depth*.

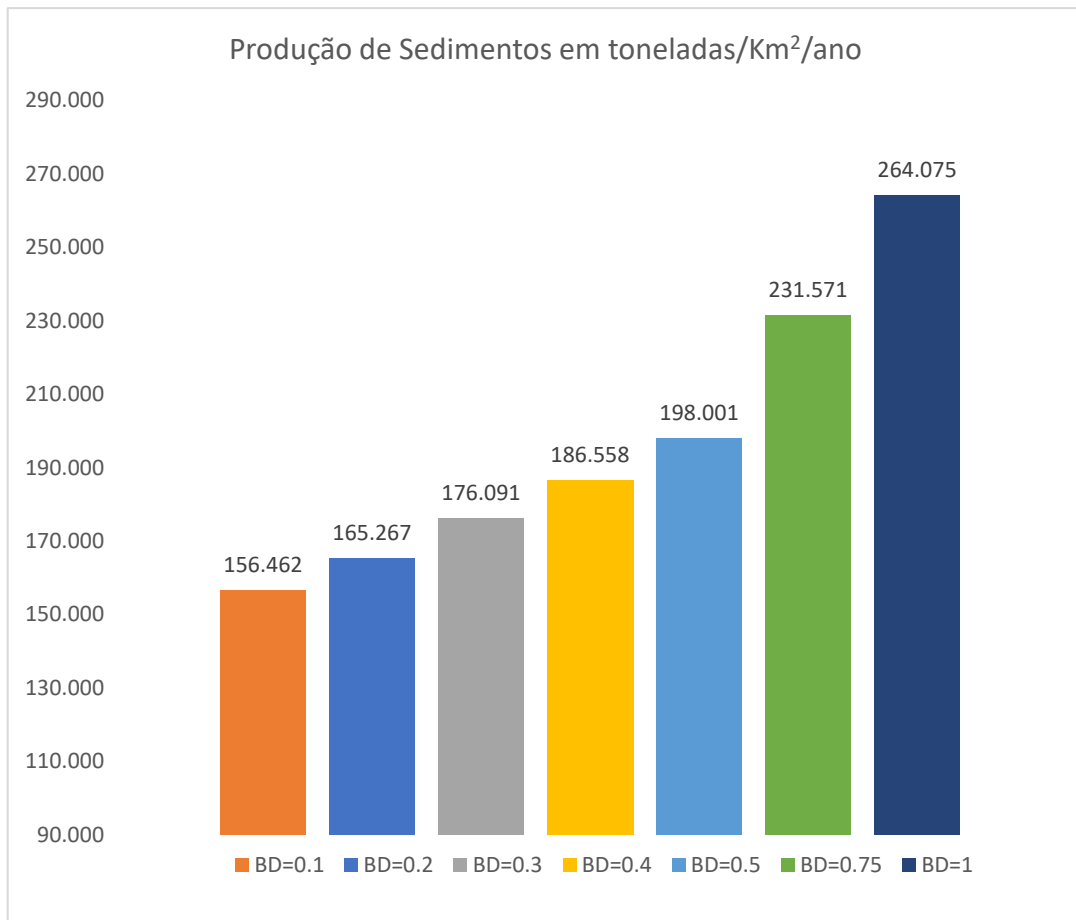


Fig. 52 - Produção de Sedimentos média anual na bacia do Tâmega, em toneladas/Km² /ano, para os diferentes *Bed Depth* testados

#### ▪ Impacto da Curva Granulométrica do Leito

A sensibilidade à variação da granulometria dos sedimentos do leito foi analisada “recuando” e “avançando” por ripagem a curva granulométrica de referência atrás referida (Fig. 53). O recuo da curva implica na sua composição sedimentos de menores dimensões (mais finos), enquanto o avanço considera sedimentos de maiores dimensões (mais grossos).

Nas simulações realizadas, os restantes parâmetros testados mantiveram-se fixos (*Threshold* = 10 m³/s, *Active Layer Factor* = 2, *Bed Depth* = 0,3 m).

Os resultados das simulações, em termos de produções de sedimentos na bacia do Tâmega, para as diferentes curvas granulométricas são apresentados no gráfico da (Fig. 54).

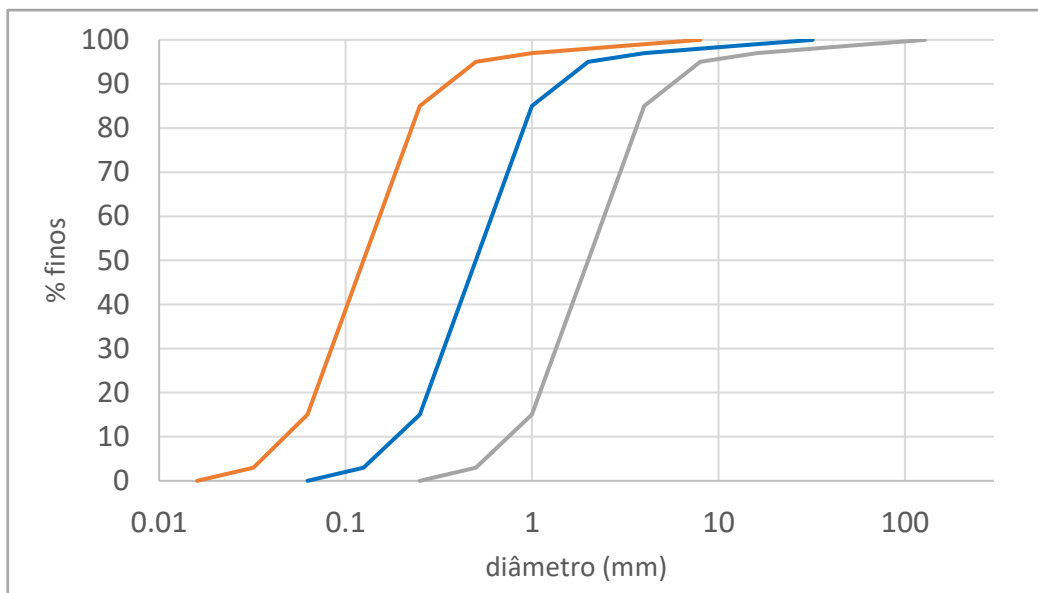


Fig. 53 - Curvas Granulométricas do Leito do Rio analisadas

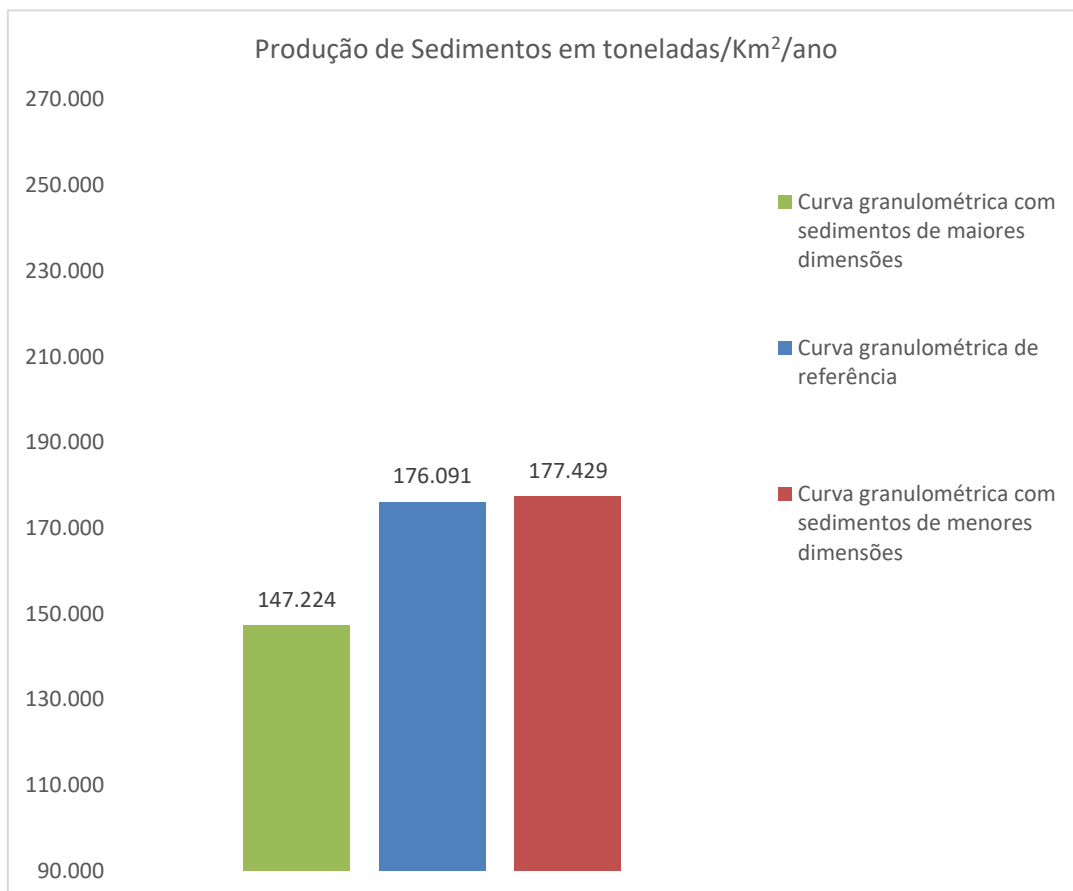


Fig. 54 - Produção de Sedimentos média anual na bacia do Tâmega. em toneladas/Km2/ano, para as diferentes Curvas Granulométricas testadas

Como é possível verificar, um leito com sedimentos mais finos originou uma produção de sedimentos ligeiramente mais elevada, enquanto um leito com sedimentos de maiores dimensões originou uma significativa redução da produção de sedimentos.

#### 3.6.2.4. Produção de sedimentos média diária

Nos gráficos da (Fig. 55) apresenta-se a produção de sedimentos média diária na bacia do Tâmega obtida com o modelo HEC-HMS, admitindo para os parâmetros testados os seguintes valores: *Threshold* = 10 m<sup>3</sup>/s; *Active Layer Factor* = 2; *Bed Depth* = 0,3 m; e curva granulométrica de referência. Representam-se também os registos das precipitações diárias que serviram de base à definição do modelo meteorológico considerado. Da sua análise verifica-se que para o período de 13 anos estudado (1 de janeiro de 1980 a 1 de janeiro de 1993), apenas os eventos mais significativos de precipitação contribuíram para a produção de sedimentos

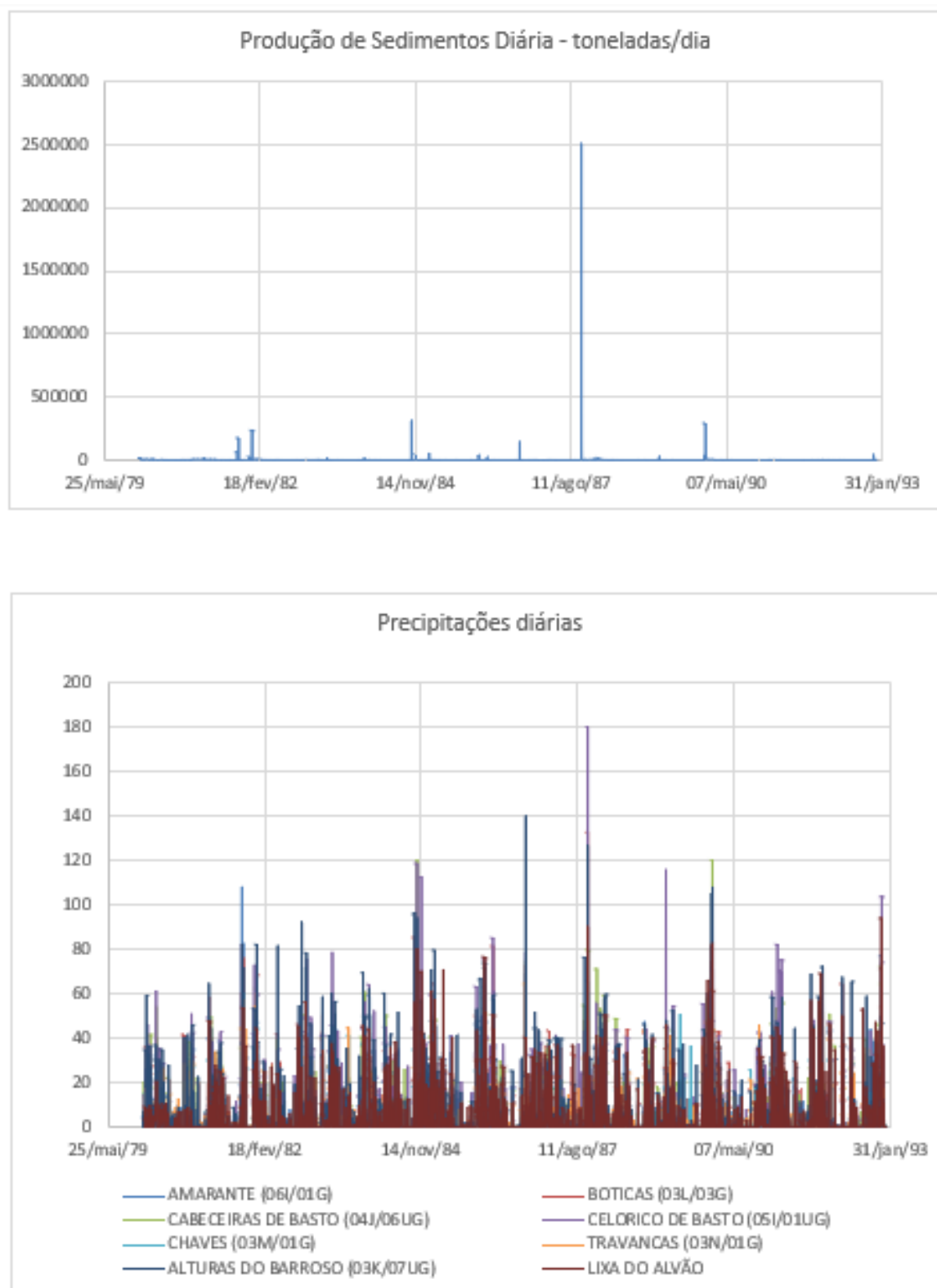


Fig. 55 - Produção de Sedimentos Média Diária e Precipitações Diárias de 01/jan/1980 a 01/jan/1993

### 3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos métodos utilizados para estimar a produção de sedimentos na bacia do Tâmega que podem afluir à albufeira da barragem do Torrão foram encontrados os seguintes valores:

- entre as 33 e as 141 toneladas/km<sup>2</sup>/ano, quando a produção foi estimada através do modelo RUSLE (ver 3.5.2.), em que os fatores foram obtidos a partir de bases de dados a nível europeu atualizadas, tratadas com recurso a ferramentas SIG, em combinação com as fórmulas empíricas selecionadas para descrever o Fator de Entrega Sedimentar – SDR;
- e entre as 99 (Fig.50) e as 264 (Fig. 52) toneladas/km<sup>2</sup>/ano, quando a produção foi estimada usando o modelo de simulação hidrológica HEC-HMS, considerando as variações de diferentes parâmetros que definem os modelos de erosão e sedimentação utilizados, considerados mais relevantes;

No caso da aplicação do modelo RUSLE, a diferença entre o valor mínimo e máximo obtidos está diretamente associada à diferença entre os valores mínimo e máximo considerados para o fator de entrega de sedimentos da bacia, os quais foram fixados recorrendo a expressões empíricas disponíveis na bibliografia.

No caso da aplicação do modelo de simulação hidrológica HEC-HMS, foram testados diferentes valores para alguns dos parâmetros que caracterizam os modelos envolvidos no cálculo da produção de sedimentos, tendo-se verificado que para alguns desses parâmetros o valor adotado tem um impacto significativo no resultado final, como é o caso do limiar que define quais os eventos de precipitação contribuem para a produção de sedimentos (*Threshold*) e também da espessura da camada de sedimentos existentes nos leitos das linhas de água (*Bed Depth*).

Importa referir que a gamas de valores para a produção de sedimentos na bacia do Tâmega a que se chegou neste estudo enquadram com valores obtidos noutros trabalhos do mesmo tipo realizados para esta bacia, tais como:

- o “Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Douro”(INAG, 1999), onde através da aplicação da Equação Universal da Perda de Solo, se estimou uma produção de sedimentos específica média de 147 toneladas/km<sup>2</sup>/ano;
- ou o “Projeto do Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão”(EDP, 2011), onde baseado na estimativa da quantidade de sedimentos depositados na albufeira do Torrão ao longo de 22 anos, se estimou uma produção de sedimentos específica média de 111 toneladas/km<sup>2</sup>/ano.



# 4

## CONCLUSÕES

A análise do impacto que as barragens têm no ciclo hidrossedimentológico natural implica que se conheça a capacidade que a bacia hidrográfica por si dominada tem de produzir sedimentos.

Esta questão e outras, como os riscos de degradação dos solos, dos leitos dos rios e dos ecossistemas fluviais e estuarinos, ou de contaminação dos sedimentos por produtos químicos, levaram a que se desse atenção aos problemas que podem decorrer das alterações do ciclo hidrossedimentológico natural. Nesse contexto, nas últimas décadas, vários modelos de cálculo foram desenvolvidos com a finalidade de representar e quantificar os processos de destacamento, transporte e deposição de solo erodido.

Os modelos disponíveis para realizar tais análises podem variar desde abordagens empíricas mais simplificadas a modelos mais complexos, que pretendem simular os principais processos envolvidos neste fenómeno.

No presente trabalho, que teve como objetivo estimar os volumes de sedimentos afluentes à albufeira da barragem do Torrão, foram consideradas as seguintes metodologias de cálculo:

- Aplicação do modelo empírico USLE / RUSLE, com recurso a mapas atualizados dos vários fatores intervenientes, usando ferramentas SIG na sua análise, e com recurso às fórmulas empíricas que descrevem o Fator de Entrega Sedimentar;
- Aplicação do modelo de simulação hidrológica HEC-HMS, mobilizando a modelação da componente hidrossedimentológica.

O modelo USLE (Wischmeier e Smith, 1978) e a sua revisão (RUSLE) (Renard et al., 1991) são de longe os modelos de previsão de erosão do solo mais aplicados globalmente e, de acordo com (Risse et al., 1993): “O USLE tem sido usado em todo o mundo, para uma variedade de finalidades e em muitas condições diferentes, simplesmente porque parece atender a necessidade, melhor do que qualquer outra ferramenta disponível”.

A caracterização de cada um dos fatores do modelo RUSLE foi realizada com base nos mapas desenvolvidos a nível europeu, obtidos a partir da ESDAC, *European Soil Data Centre*, resultantes de camadas de entrada atualizadas de precipitação, solo, topografia, uso e gestão de solo.

O programa de cálculo automático HEC-HMS, desenvolvido pelo “*Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *United States Army Corps of Engineers* dispõe de vários modelos para simular os diferentes processos hidrológicos, nomeadamente, a infiltração e interceção da precipitação, a formação de escoamento superficial, o escoamento base e a propagação do escoamento, e dispõe também de modelos para simular os processos de erosão e transporte de sedimentos. Além disso, tem a capacidade de realizar

simulações de eventos, de dias ou horas, ou simulações contínuas que englobam períodos de cheia e de estiagem ao longo de vários anos.

Na aplicação do modelo HEC-HMS, realizada no presente trabalho, recorreu-se a registos de precipitações diárias de um conjunto de 8 postos udométricos existentes na bacia do Tâmega e foi realizada uma simulação contínua, relativa a um período de 13 anos. Para o cálculo da erosão hídrica, de entre os vários métodos que o HEC-HMS tem disponível, foi adotado o modelo MUSLE, o que permitiu comparar os resultados da erosão hídrica obtidos a partir deste modelo com os obtidos através do modelo RUSLE.

Da aplicação destas metodologias obtiveram-se os seguintes valores de produção de sedimentos na bacia do Tâmega que podem fluir à albufeira da barragem do Torrão:

- entre as 33 e as 141 toneladas/km<sup>2</sup>/ano, quando a produção foi estimada através do modelo RUSLE;
- e entre as 99 e as 264 toneladas/km<sup>2</sup>/ano, quando a produção foi estimada usando o modelo de simulação hidrológica HEC-HMS.

No caso da aplicação do modelo RUSLE, a diferença entre os valores mínimo e máximo obtidos está diretamente associada à diferença entre os valores mínimo e máximo considerados para o fator de entrega de sedimentos da bacia, os quais foram fixados recorrendo a expressões empíricas disponíveis na bibliografia.

No caso da aplicação do modelo de simulação hidrológica HEC-HMS, foram testados diferentes valores para alguns dos parâmetros que caracterizam os modelos envolvidos no cálculo da produção de sedimentos, tendo-se verificado que para alguns desses parâmetros o valor adotado tem um impacto significativo no resultado final, como é o caso do limiar que define quais os eventos de precipitação contribuem para a produção de sedimentos (*Threshold*) e também da espessura da camada de sedimentos existentes nos leitos das linhas de água (*Bed Depth*).

Importa referir que a gama de valores para a produção de sedimentos na bacia do Tâmega a que se chegou neste estudo enquadraram valores obtidos noutros trabalhos do mesmo tipo realizados para esta bacia, tais como:

- o “Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Douro” (INAG, 1999), onde através da aplicação da Equação Universal da Perda de Solo, se estimou uma produção de sedimentos específica média de 147 toneladas/km<sup>2</sup>/ano;
- ou o “Projeto do Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão” (EDP, 2011), onde baseado na estimativa da quantidade de sedimentos depositados na albufeira do Torrão ao longo de 22 anos, se estimou uma produção de sedimentos específica média de 111 toneladas/km<sup>2</sup>/ano.

Com ambas as metodologias que foram usadas, é possível obter resultados para a produção de sedimentos média anual na bacia do Tâmega, convergentes entre si e consistentes com outros estudos. A aplicação do modelo HEC-HMS permite também a obtenção de resultados de produção de sedimentos a nível diário, ao longo de um período de vários anos, o que pode potenciar análises subsequentes mais detalhadas sobre a forma como os sedimentos são retidos e distribuídos na albufeira.

Naturalmente que os resultados obtidos estão afetados pelos valores admitidos para alguns dos parâmetros que caracterizam os modelos, alguns deles estimados usando referências de outras geografias. Desta forma, para que os modelos possam ser validados será necessário realizar estudos que permitam aprofundar o conhecimento sobre vários fatores, tais como:

- O coeficiente da entrega sedimentar, através da medição do volume de sedimentos depositados em várias albufeiras portuguesas e da análise da erosão das respetivas bacias hidrográficas através da aplicação do modelo RUSLE, que permitam estabelecer relações entre o coeficiente de entrega sedimentar com a área da bacia hidrográfica específicas para as várias regiões de Portugal;
- Curvas granulométricas representativas dos sedimentos depositados nos leitos das principais linhas de água da bacia do Tâmega, através de recolha e caracterização de amostras;
- Espessura da camada de sedimentos depositados nos leitos das principais linhas de água da bacia do Tâmega;
- Medição de sedimentos (em suspensão e por arraste) em vários pontos das principais linhas de água da bacia do Tâmega.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroconsultores. (2001). *Carta de Aptidão da Terra de Entre-Douro e Minho*. Lisboa: IDRHa - Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica.
- Agroconsultores. (2003). *Carta de Aptidão e Uso da Terra, Zona Interior Centro (ZIC)*. Lisboa: Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica.
- Almeida, C., Mendonça, J., Jesus, M., & Gomes, A. (2000). *Sistemas aquíferos de Portugal Continental – Veiga de Chaves A1*. INAG.
- Almeida, L., & Serra, J. V. (2017). *Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas*. FAE, Curitiba, 129-137.
- Arabi, M., Frankenberger, J., Engel, B., & Arnold, J. (2008). *Representation of agricultural practices with SWAT*. Hydrological Processes, 3042–3055.
- Avwunudiogba, A., & Hudson, P. F. (2014). *A Review of Soil Erosion Models with Special Reference to the needs of Humid Tropical Mountainous Environments*. European Journal of Sustainable Development, 299-310.
- Ballabio, C., Panagos, P., & Monatanarella, L. (2016). *Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database*. Geoderma, 261, 110-123.
- Barati, R. (2011). *Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models Using Nelder-Mead Simplex Algorithm*. Journal of Hydrologic Engineering, 946-954.
- Blanco, H., & Lal, R. (2008). *Principles of Soil Conservation and Management*. New York: Springer.
- Brown, L., & Foster, G. (1987). *Storm Erosivity Using Idealized Intensity Distribution*. Transactions of the ASAE, 379-386.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill.
- CNPGB. (s.d.). *Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens*. Obtido em Maio de 2021, de [https://cnpgb.apambiente.pt/gr\\_barragens/gbportugal/Torraodes.htm](https://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Torraodes.htm)
- Coutinho, M. A., & Tomás, P. (1993). *Estudo do parâmetro de erosividade da equação universal de degradação de solos*. CEHIDRO – Centro de Estudos de Hidrossistemas.
- de Farias, C. A., Bezerra, U. A., & da Silva Filho, J. A. (2015). *Runoff-erosion modeling at micro-watershed scale: a comparison of self-organizing maps structures*. Geoenvironmental Disasters.
- Declercq, F., & Poesen, J. (1992). *Evaluation of two models to calculate the soil erodibility factor K*. Pedologie, 149-169.
- Desmet, P. J., & Govers, G. (1996). *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. Journal of Soil and Water Conservation, 427-433.
- Earthdata, N. (2021). *Earthdata Search*. Obtido de <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- EDP, E. d. (2011). *Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão*.
- Elwell, H., & Stocking, M. (1982). *Developing a simple yet practical method of soil-loss estimation*. Tropical agriculture.

- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Copenhagen: Teknisk Forlag.
- European Soil Data Centre, (ESDAC). (s.d.). *European Commission, Joint Research Centre*. Obtido em 15 de Março de 2021, de [esdac.jrc.ec.europa.eu](http://esdac.jrc.ec.europa.eu)
- Exum, L. R., Bird, S., Harrison, J., & Perkins, C. (2005). *Estimating and Projecting Impervious Cover in the Southeastern United States*. Atlanta, Georgia: Ecosystems Research Division National Exposure Research Laboratory U.S. Environmental Protection Agency.
- Farrell, E. J., & Sherman, D. (2015). *A new relationship between grain size and fall (settling) velocity in air*. *Progress in Physical Geography*, 361-387.
- Fayal, M. A. (2008). *Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Rio de Janeiro, Brasil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Ferreira, C. (2013). *O Mundo (Im) Perfeito dos modelos de erosão*. *Revista da Faculdade de Letras*, 51-82.
- Ferreira, C. G. (1996). *Erosão Hídrica em solos florestais. Estudo em povoamentos de Pinus Pinaster e Eucalyptus Glohulus em Macieira de Alcôba-Águeda*. *Revista da Faculdade de Letras*, 145-244.
- Figueiredo, T. d. (1989). *Estimativa de Erodibilidade em alguns perfis de Unidades de Solo representativas de Trás-os-montes: 1 primeira aproximação*. (p. 16). Instituto Politécnico de Bragança.
- Figueiredo, T. d. (2001). *Pedregosidade e Erosão Hídrica dos Solos em Trás-os-Montes: Contributo para a interpretação de registos em vinhais ao alto na Região*.
- Flanagan, D. C., Gilley, J., & Franti, T. (2007). *Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements*. *Transactions of the ASABE*, 1603-1612.
- Foster, G. R., Meyer, L., & Onstad, C. (1977). *A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates*. *Transactions of the ASAE*, 683-687.
- Frey, H., & Paul, F. (2012). *On the Suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the Compilation of Topographic Parameters in Glacier Inventories*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 480-490.
- Gassman, P. W., Reyes, M., Green, C., & Arnold, J. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. Ames, Iowa.
- Gassman, P., Reyes Reyes, M., Green, C. H., & Arnold, J. (2007). *Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*,. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1211-1250.
- Gee, G., & Bauder, J. (1986). *Particle size analysis. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.*, 383-411.
- Gibson, S., & Cai, C. (2017). *Flow Dependence of Suspended Sediment Gradations*. *Water Resources Research*.
- Guth, P. (2006). *Geomorphometry from SRTM: Comparison to NED*. *Geography: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 269-277.

- Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. New York, United States of America: Macmillan.
- Hickey, R. (2000). *Slope angle and slope length solutions for GIS*. Cartography, 1-8.
- Hipólito, J. R., & Vaz, Á. C. (2017). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Lisboa: IST Press.
- Holberg, J. (2014). *Tutorial on using HEC-GeoHMS to develop Soil Moisture Accounting Method Inputs for HEC-HMS*. Lyles School of Civil Engineering, Purdue University.
- INAG. (1999). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Douro*.
- Kirkby, M. (1988). *Hillslope runoff processes and models*. Journal of Hydrology, 315-339.
- Knisel, W. G. (1980). *CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. United States. Dept. of Agriculture. Science and Education Administration.
- Knisel, W. G., & Turtola, E. (2000). *Gleams model application on a heavy clay soil in Finland*. Agricultural Water Management, 285-309.
- Krone, R. (1962). *Flume Studies of the Sediment Transport in Alluvial Streams*. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory.
- Laursen, E. M. (1958). *The total sediment load of streams*. Journal of the Hydraulics Division. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1530-1–1530-36.
- Legate, D. R., & McCabe Jr., G. (1999). *Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic*. Water Resources Research, 233-241.
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B., Tang, Z., Choi, J., & Kim, K.-S. (2005). *GIS-based sediment assessment tool*. CATENA, 61-80.
- McCarthy, F. D. (1938). *Aboriginal Relics and their Preservation*. Mankind, 120-126.
- McCool, D. K., Foster, G., Mutchler, C., & Meyer, L. (1989). *Revised slope length factor for the universal soil loss equation*. Transactions of the ASAE, 1571-1576.
- Meyer, L., & Harmon, W. (1985). *Sediment losses from cropland furrows of different gradients*. Transactions of the ASAE, 448-453.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). *Formulas for Bed-Load transport*. Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, 39-64.
- Miller, J. E. (1984). *Basic Concepts of Kinematic-Wave Models*. Washington DC: United States Government Printing Office .
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). *Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation*. Soil Science Society of America Journal.
- Morgan, R. (2005). *Soil Erosion and Conservation*, Third Edition. USA: Blackwell Publishing Ltd.
- Morgan, R., & Nearing, M. (2011). *Handbook of Erosion Modelling*. Wiley-Blackwell.
- Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., . . . Styczen, M. (1998). *The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. Earth Surface Processes and Landforms, 527–544.
- Moriasi, D. N., Wilson, B., Douglas-Mankin, K., Arnold, J., & Gowda, P. (2012). *Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation*. Transactions of the ASABE, 1241-1247.

- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., & Harmel, R. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Trans. ASABE, 885-900.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). *River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles*. Journal of Hydrology, 282-290.
- Nearing, M., Romkens, M., Norton, L., Stott, D., Rhoton, F., Laflen, J., . . . Crosson, P. (2000). *Measurements and models of soil loss rates*. Science.
- Oliveira, P. T., Rodrigues, D. B., Sobrinho, T. A., & Panachuki, E. (2010). *Estimating of the USLEtopographic factor from three algorithms*. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 17-225.
- Pak, J. H., Fleming, M., Scharffenberg, W., & Ely, P. (2008). *Soil Erosion and Sediment Yield Modeling with the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. World Environmental and Water Resources Congress 2008 (p. 10). Honolulu, Hawaii, United States: ASCE.
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., . . . Alewell, C. (2015a). *Rainfall erosivity in Europe*. Science of The Total Environment, 801-814.
- Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2015c). *A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water*. Geosciences(5), 117-126.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015b). *Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale*. Land Use Policy(48C), 38-50.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Zanden, E. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015d). *Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale*. Environmental Science & Policy(51), 23-34.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., . . . Alewell, C. (2015e). *The new assessment of soil loss by water erosion in Europe*. Environmental Science & Policy, 438-447.
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). *Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS*. Science of The Total Environment, 189-200.
- Portela, M. M. (2006). *Modelação Hidrológica. Textos de apoio à disciplina de Modelação*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Quintela, A. d., & Portela, M. (2002). *A Modelação Hidrológica em Portugal nos Últimos 25 Anos do Século XX, nas Perspectivas Determinística, Probabilística e Estocástica*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 51-64.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). *Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Rawls, W., Brakensiek, C., & Saxton, K. (1982). *Estimation of soil water properties*. Transactions ASAE, 1316-1320.
- Remortel, R. D., Hamilton, M., & Hickey, R. (2001). *Estimating the LS Factor for RUSLE through Iterative Slope Length Processing of Digital Elevation Data within ArcInfo Grid*. Cartography, 27-35.
- Remortel, R., Maichle, R., & Hickey, R. (2004). *Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable*. Computers & Geosciences, 1043-1053.

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G., & Porter, J. P. (1991). *RUSLE: Revised universal soil loss equation*. Journal of Soil and Water Conservation January, 30-33.
- Renard, K., & Foster, G. (1983). *Soil conservation, principles of erosion by water*. American Society of Agronomy. Agronomy, a series of monographs., 155–176.
- Renard, K., Foster, G. R., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington DC: USDA, United States Department of Agriculture.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & D.C., Y. (1996). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook 703. USDA-ARS.
- Renschler, C. S., & Harbor, J. (2002). *Soil erosion assessment tools from point to regional scales—the role of geomorphologists in land management research and implementation*. Geomorphology, 189-209.
- Rijn, L. V. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Netherlands: Aqua Publications.
- Risse, M., Nearing, M., Nicks, A., & Laflen, J. (1993). *Error Assessment in the Universal Soil Loss Equation*. Soil Science Society of America Journal, 825-833.
- Rodrigues, C. M., Shahidian, S., Guimarães, R. C., Chambel, A., Alexandre, C., Santos, F., . . . Coelho, R. (2017). *Hidrologia Agrícola*. Évora: Impresso pela Libéris.
- Romkens, M. J., & Wang, J. (1987). *Soil Roughness Changes from Rainfall*. Transactions of the ASAE, 101-107.
- Rubey, W. (1933). *Settling velocities of gravel, sand and silt particles*. American Journal of Science, 325-338.
- Scharffenberg, W. (Janeiro de 2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual*.
- Schwab, G. O., Frevert, R., Edminster, T., & Barnes, K. (1981). *Soil and water conservation engineering*. New York, USA: Wiley.
- Singh, K. P., & Durgunoglu, A. (1989). *Developing accurate and reliable stream sediment yields*. Sediment and the Environment (Proceedings of the Baltimore Symposium) (pp. 193-199). IAHS.
- Smith, D. D., & Whitt, D. M. (1947). *Estimating soil loss from field areas of claypan soils*. Science Society Am. Pro., 485-490.
- Toffaleti, F. B. (1968). *Procedure for Computation of the Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface*. Committee on Channel Stabilization, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi.
- Tucci, C. E. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS Editora.
- Tucci, C. E. (2000). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre, Brasil: EFRGS Editora.
- Tucci, C. E. (14 de fevereiro de 2010). *Modelos hidrológicos distribuídos*. Obtido de Rhama, Porto Alegre: <http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>
- USACE. (2015). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Applications Guide*. Davis, California.

- USACE. (Março de 2021). *Hydrologic Modeling with HEC-HMS*. Obtido de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstr/hydrologic-modeling-with-hec-hms-march-2021-42175930.html>
- USACE-HEC. (2000). *Hydrologic modelling system HEC-HMS technical reference manual*. USA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre (HEC).
- USDA. (1 de junho de 1983). *National Soil Survey Handbook (NSSH) title 430-VI*. Obtido de U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: [http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2\\_054242](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054242)
- Vanoni, V. (1975). *Sedimentation Engineering Manual and Report No. 54*. New York, United States of America: American Society of Civil Engineers.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (2005). *Introduction to Hydrology*. PEARSON EDUCATION.
- Walling, D. (1983). *The sediment delivery problem*. Journal of Hydrology, 209-237.
- White, W., & Ackers, P. (1973). *Sediment transport: new approach and analysis*. Journal of the Hydraulics Division, 2041-2060.
- Wilcock, P. R., & Crowe, J. (2003). *Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Wilde, M., Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J., & Hervás, J. (2018). *Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2*. Journal of Maps, 14(2), 97-104 and supplemental map.
- Williams, J. R. (1975). *Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor*. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources: Proceedings of the Sediment Yield Workshop, 244-252.
- Williams, J. R., Jones, C., Kiniry, J., & Spanel, D. (1989). *The EPIC Crop Growth Model*. Transactions of the ASAE, 497-511.
- Williams, J., & Berndt, H. (1977). *Sediment yield prediction based on watershed hydrology*. Transactions of the ASAE, 1100-1104.
- Wischmeier, W. (1975). *Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed lands*. U. S. Department of Agriculture, 118-125.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington DC: USDA, United States Department of Agriculture.
- Wischmeier, W., Johnson, C., & Cross, B. (1971). *Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. Journal of Soil and Water Conservation, 189-193.
- Wolock, D., & Price, C. (1994). *Effect of Digital Elevation Model Map Scale and Data Resolution on a Topography-Based Watershed Model*. Water Resources Research, 3041-3052.
- Wu, S., Li, J., & Huang, G. (2005). *An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models*. Environmental Modeling and Assessment, 33-42.
- Yang, C. T. (1984). *Unit Stream Power Equation for Gravel*. Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE, 1783-1797.

## ANEXOS

### Anexo 1 - Áreas de Influências dos Postos Seleccionados em cada uma das sub-bacias

| Estação | ALTURAS<br>DO<br>BARROSO | AMARANTE | BOTICAS | CABECEIRAS<br>DE BASTO | CELORICO<br>DE BASTO | CHAVES | LIXA<br>DO<br>ALVÃO | TRAVANCAS |
|---------|--------------------------|----------|---------|------------------------|----------------------|--------|---------------------|-----------|
| TAM 1   | 0,015                    | -        | 0,462   | -                      | -                    | 0,443  | -                   | 0,080     |
| TAM 2   | -                        | -        | -       | -                      | -                    | 0,016  | -                   | 0,984     |
| TAM 3   | -                        | -        | -       | -                      | -                    | 0,269  | -                   | 0,731     |
| TAM 4   | -                        | -        | 0,002   | -                      | -                    | 0,822  | -                   | 0,176     |
| TAM 5   | -                        | -        | 0,711   | -                      | -                    | 0,289  | -                   | -         |
| TAM 6   | -                        | -        | 0,805   | -                      | -                    | 0,195  | -                   | -         |
| TAM 7   | -                        | -        | 0,314   | -                      | -                    | 0,651  | 0,035               | -         |
| TAM 8   | -                        | -        | 0,868   | -                      | -                    | -      | 0,132               | -         |
| TAM 9   | -                        | -        | 0,116   | -                      | -                    | -      | 0,884               | -         |
| TAM 10  | -                        | -        | -       | 0,049                  | -                    | -      | 0,951               | -         |
| TAM 11  | 0,026                    | -        | 0,974   | -                      | -                    | -      | -                   | -         |
| TAM 12  | 0,266                    | -        | 0,666   | -                      | -                    | -      | 0,068               | -         |
| TAM 13  | 1,000                    | -        | -       | -                      | -                    | -      | -                   | -         |
| TAM 14  | 0,761                    | -        | -       | 0,181                  | -                    | -      | 0,058               | -         |
| TAM 15  | 0,009                    | -        | -       | 0,991                  | -                    | -      | -                   | -         |
| TAM 16  | -                        | -        | -       | 0,997                  | 0,003                | -      | -                   | -         |
| TAM 17  | -                        | -        | -       | 0,204                  | -                    | -      | 0,796               | -         |
| TAM 18  | -                        | -        | -       | 0,377                  | 0,623                | -      | -                   | -         |
| TAM 19  | -                        | -        | -       | 0,109                  | 0,708                | -      | 0,183               | -         |
| TAM 20  | -                        | 0,058    | -       | -                      | 0,942                | -      | -                   | -         |
| TAM 21  | -                        | 0,597    | -       | -                      | 0,403                | -      | -                   | -         |
| TAM 22  | -                        | 0,077    | -       | -                      | 0,698                | -      | 0,225               | -         |
| TAM 23  | -                        | 1,000    | -       | -                      | -                    | -      | -                   | -         |
| TAM 24  | -                        | 0,894    | -       | -                      | 0,106                | -      | -                   | -         |
| TAM 25  | -                        | 1,000    | -       | -                      | -                    | -      | -                   | -         |

**Anexo 2 - Parâmetros Requeridos pelo Método Kinematic Wave no HEC-HMS**

| Parâmetros do Modelo de Transformação<br><i>Kinematic Wave</i> |                    |     |             |         |                       |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|-----|-------------|---------|-----------------------|
| Sub-bacias                                                     | Área               |     | Comprimento | Declive | Fator Rugosidade      |
|                                                                | (Km <sup>2</sup> ) | (%) | (m)         |         | (m <sup>-1/3</sup> s) |
| <b>TAM1</b>                                                    | 85,8               | 26% | 2455        | 0,15    | 0,3                   |
|                                                                | 239,4              | 74% | 6849        | 0,15    | 0,3                   |
| <b>TAM2</b>                                                    | 97,8               | 36% | 3058        | 0,25    | 0,3                   |
|                                                                | 172,3              | 64% | 5387        | 0,25    | 0,3                   |
| <b>TAM3</b>                                                    | 61,7               | 28% | 4233        | 0,15    | 0,3                   |
|                                                                | 160,7              | 72% | 11021       | 0,15    | 0,3                   |
| <b>TAM4</b>                                                    | 87,3               | 37% | 5541        | 0,15    | 0,3                   |
|                                                                | 148,5              | 63% | 9424        | 0,15    | 0,3                   |
| <b>TAM5</b>                                                    | 59,6               | 71% | 3374        | 0,15    | 0,3                   |
|                                                                | 24,3               | 29% | 1376        | 0,15    | 0,3                   |
| <b>TAM6</b>                                                    | 115,0              | 82% | 3923        | 0,20    | 0,3                   |
|                                                                | 26,0               | 18% | 887         | 0,20    | 0,3                   |
| <b>TAM7</b>                                                    | 32,5               | 22% | 1384        | 0,20    | 0,3                   |
|                                                                | 115,1              | 78% | 4901        | 0,20    | 0,3                   |
| <b>TAM8</b>                                                    | 14,6               | 59% | 1720        | 0,30    | 0,3                   |
|                                                                | 10,1               | 41% | 1190        | 0,30    | 0,3                   |
| <b>TAM9</b>                                                    | 35,9               | 39% | 1620        | 0,20    | 0,3                   |
|                                                                | 56,2               | 61% | 2536        | 0,20    | 0,3                   |
| <b>TAM10</b>                                                   | 27,8               | 32% | 1484        | 0,25    | 0,3                   |
|                                                                | 60,4               | 68% | 3224        | 0,25    | 0,3                   |
| <b>TAM11</b>                                                   | 42,4               | 57% | 2411        | 0,15    | 0,3                   |
|                                                                | 31,7               | 43% | 1803        | 0,15    | 0,3                   |
| <b>TAM12</b>                                                   | 45,6               | 59% | 1896        | 0,20    | 0,3                   |
|                                                                | 31,4               | 41% | 1307        | 0,20    | 0,3                   |
| <b>TAM13</b>                                                   | 58,3               | 53% | 2713        | 0,15    | 0,3                   |
|                                                                | 50,8               | 47% | 2364        | 0,15    | 0,3                   |

**Anexo 2 - Parâmetros Requeridos pelo Método Kinematic Wave no HEC-HMS**

|              |       |     |      |      |     |
|--------------|-------|-----|------|------|-----|
| <b>TAM14</b> | 65,7  | 88% | 5790 | 0,20 | 0,3 |
|              | 8,6   | 12% | 755  | 0,20 | 0,3 |
| <b>TAM15</b> | 58,6  | 82% | 5351 | 0,15 | 0,5 |
|              | 12,9  | 18% | 1178 | 0,30 | 0,5 |
| <b>TAM16</b> | 104,5 | 57% | 4338 | 0,15 | 0,5 |
|              | 78,1  | 43% | 3242 | 0,15 | 0,5 |
| <b>TAM17</b> | 116,3 | 71% | 3525 | 0,15 | 0,5 |
|              | 47,4  | 29% | 1437 | 0,15 | 0,5 |
| <b>TAM18</b> | 57,4  | 66% | 4314 | 0,15 | 0,5 |
|              | 30,1  | 34% | 2262 | 0,30 | 0,5 |
| <b>TAM19</b> | 28,5  | 46% | 1725 | 0,20 | 0,5 |
|              | 33,9  | 54% | 2052 | 0,20 | 0,5 |
| <b>TAM20</b> | 62,7  | 73% | 3545 | 0,15 | 0,5 |
|              | 23,6  | 27% | 1334 | 0,25 | 0,5 |
| <b>TAM21</b> | 42,1  | 57% | 2311 | 0,15 | 0,5 |
|              | 31,5  | 43% | 1729 | 0,15 | 0,5 |
| <b>TAM22</b> | 91,7  | 69% | 2440 | 0,30 | 0,5 |
|              | 41,8  | 31% | 1112 | 0,30 | 0,5 |
| <b>TAM23</b> | 110,9 | 83% | 6190 | 0,20 | 0,5 |
|              | 23,0  | 17% | 1284 | 0,20 | 0,5 |
| <b>TAM24</b> | 144,0 | 72% | 4958 | 0,20 | 0,5 |
|              | 55,7  | 28% | 1918 | 0,20 | 0,5 |
| <b>TAM25</b> | 56,9  | 55% | 3894 | 0,20 | 0,5 |
|              | 46,9  | 45% | 3210 | 0,20 | 0,5 |

**Anexo 3 - Escoamento Base e Caudal Base Mensal Médio 1980-1993 após análise das curvas de caudais médios diários classificados**

| (m³/s)                   | JAN   | FEV   | MAR   | ABR   | MAI   | JUN   | JUL   | AGO   | SET   | OUT   | NOV   | DEZ   |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Caudal Base Médio</b> | 0,025 | 0,028 | 0,018 | 0,018 | 0,012 | 0,006 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,010 | 0,025 |
| <b>TAM1</b>              | 8,1   | 9,2   | 5,9   | 5,8   | 3,8   | 2,0   | 0,7   | 0,2   | 0,2   | 0,8   | 3,3   | 8,1   |
| <b>TAM2</b>              | 6,7   | 7,6   | 4,9   | 4,8   | 3,1   | 1,7   | 0,6   | 0,2   | 0,2   | 0,7   | 2,7   | 6,8   |
| <b>TAM3</b>              | 5,5   | 6,3   | 4,1   | 3,9   | 2,6   | 1,4   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,6   | 2,3   | 5,6   |
| <b>TAM4</b>              | 5,9   | 6,6   | 4,3   | 4,2   | 2,7   | 1,5   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,6   | 2,4   | 5,9   |
| <b>TAM5</b>              | 2,1   | 2,4   | 1,5   | 1,5   | 1,0   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,9   | 2,1   |
| <b>TAM6</b>              | 3,5   | 4,0   | 2,6   | 2,5   | 1,6   | 0,9   | 0,3   | 0,1   | 0,1   | 0,4   | 1,4   | 3,5   |
| <b>TAM7</b>              | 3,7   | 4,2   | 2,7   | 2,6   | 1,7   | 0,9   | 0,3   | 0,1   | 0,1   | 0,4   | 1,5   | 3,7   |
| <b>TAM8</b>              | 0,6   | 0,7   | 0,5   | 0,4   | 0,3   | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,0   | 0,1   | 0,3   | 0,6   |
| <b>TAM9</b>              | 2,3   | 2,6   | 1,7   | 1,6   | 1,1   | 0,6   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,9   | 2,3   |
| <b>TAM10</b>             | 2,2   | 2,5   | 1,6   | 1,6   | 1,0   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,9   | 2,2   |
| <b>TAM11</b>             | 1,8   | 2,1   | 1,4   | 1,3   | 0,9   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,2   | 0,8   | 1,9   |
| <b>TAM12</b>             | 1,9   | 2,2   | 1,4   | 1,4   | 0,9   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,2   | 0,8   | 1,9   |
| <b>TAM13</b>             | 2,7   | 3,1   | 2,0   | 1,9   | 1,3   | 0,7   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,3   | 1,1   | 2,7   |
| <b>TAM14</b>             | 1,8   | 2,1   | 1,4   | 1,3   | 0,9   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,2   | 0,8   | 1,9   |
| <b>TAM15</b>             | 1,8   | 2,0   | 1,3   | 1,3   | 0,8   | 0,4   | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,2   | 0,7   | 1,8   |
| <b>TAM16</b>             | 4,5   | 5,1   | 3,3   | 3,2   | 2,1   | 1,1   | 0,4   | 0,1   | 0,1   | 0,5   | 1,9   | 4,6   |
| <b>TAM17</b>             | 4,1   | 4,6   | 3,0   | 2,9   | 1,9   | 1,0   | 0,4   | 0,1   | 0,1   | 0,4   | 1,7   | 4,1   |
| <b>TAM18</b>             | 2,2   | 2,5   | 1,6   | 1,6   | 1,0   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,9   | 2,2   |
| <b>TAM19</b>             | 1,6   | 1,8   | 1,1   | 1,1   | 0,7   | 0,4   | 0,1   | 0,0   | 0,0   | 0,2   | 0,6   | 1,6   |
| <b>TAM20</b>             | 2,1   | 2,4   | 1,6   | 1,5   | 1,0   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,9   | 2,2   |
| <b>TAM21</b>             | 1,8   | 2,1   | 1,3   | 1,3   | 0,9   | 0,5   | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,2   | 0,7   | 1,8   |
| <b>TAM22</b>             | 3,3   | 3,8   | 2,4   | 2,4   | 1,6   | 0,8   | 0,3   | 0,1   | 0,1   | 0,3   | 1,4   | 3,3   |
| <b>TAM23</b>             | 3,3   | 3,8   | 2,4   | 2,4   | 1,6   | 0,8   | 0,3   | 0,1   | 0,1   | 0,3   | 1,4   | 3,4   |
| <b>TAM24</b>             | 5,0   | 5,6   | 3,6   | 3,5   | 2,3   | 1,2   | 0,4   | 0,1   | 0,1   | 0,5   | 2,0   | 5,0   |
| <b>TAM25</b>             | 2,6   | 2,9   | 1,9   | 1,8   | 1,2   | 0,6   | 0,2   | 0,1   | 0,1   | 0,3   | 1,1   | 2,6   |

**Anexo 4** - Características das Linhas de Água para os Parâmetros Requeridos pelo Método Muskingum-Cunge no HEC-HMS

| Parâmetros do Modelo de Transformação Muskingum-Cunge |             |         |                      |               |                       |
|-------------------------------------------------------|-------------|---------|----------------------|---------------|-----------------------|
| Troços da Linha de Água Principal                     | Comprimento | Declive | Secção (trapezoidal) |               | Coef, Manning         |
|                                                       | (m)         |         | Base (m)             | Declive Lados | (m <sup>-1/3</sup> s) |
| <b>REAC1</b>                                          | 14577,00    | 0,0086  | 15                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC2</b>                                          | 15754,00    | 0,0013  | 15                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC3</b>                                          | 17666,00    | 0,0031  | 15                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC4</b>                                          | 8487,00     | 0,0053  | 15                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC5</b>                                          | 18736,00    | 0,0032  | 15                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC6</b>                                          | 24019,00    | 0,0147  | 10                   | 1/2,5         | 0,10                  |
| <b>REAC7</b>                                          | 11341,00    | 0,0181  | 10                   | 1/2,5         | 0,10                  |
| <b>REAC8</b>                                          | 10952,00    | 0,0037  | 20                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC9</b>                                          | 13304,00    | 0,0026  | 20                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC10</b>                                         | 17689,00    | 0,0025  | 20                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC11</b>                                         | 17915,00    | 0,0016  | 25                   | 1/2,5         | 0,07                  |
| <b>REAC 12</b>                                        | 14611,00    | 0,0021  | 25                   | 1/2,5         | 0,04                  |

**Anexo 5** - Fatores K, LS, C e P definidos para cada sub-bacia

| Sub-Bacias | Fator K | Fator LS | Fator C | Fator P |
|------------|---------|----------|---------|---------|
| <b>1</b>   | 0,0321  | 3,6623   | 0,0832  | 0,8053  |
| <b>2</b>   | 0,0291  | 3,4515   | 0,0508  | 0,9518  |
| <b>3</b>   | 0,0372  | 2,6190   | 0,0939  | 0,8886  |
| <b>4</b>   | 0,0359  | 4,1123   | 0,1494  | 0,7372  |
| <b>5</b>   | 0,0332  | 2,4616   | 0,0846  | 0,6409  |
| <b>6</b>   | 0,0270  | 3,3963   | 0,1197  | 0,8416  |
| <b>7</b>   | 0,0341  | 4,8873   | 0,1278  | 0,5871  |
| <b>8</b>   | 0,0324  | 3,4239   | 0,0481  | 0,5921  |
| <b>9</b>   | 0,0323  | 4,4202   | 0,0911  | 0,7261  |
| <b>10</b>  | 0,0302  | 4,6581   | 0,0711  | 0,7140  |
| <b>11</b>  | 0,0222  | 2,8329   | 0,1379  | 0,9119  |
| <b>12</b>  | 0,0272  | 4,5773   | 0,0951  | 0,9137  |
| <b>13</b>  | 0,0257  | 3,0518   | 0,1184  | 0,9224  |
| <b>14</b>  | 0,0261  | 4,3216   | 0,0429  | 0,8698  |
| <b>15</b>  | 0,0275  | 4,1867   | 0,0708  | 0,9322  |
| <b>16</b>  | 0,0260  | 4,1948   | 0,0758  | 0,9241  |
| <b>17</b>  | 0,0281  | 3,9455   | 0,1400  | 0,7507  |
| <b>18</b>  | 0,0320  | 3,7474   | 0,0844  | 0,8739  |
| <b>19</b>  | 0,0257  | 4,0399   | 0,0835  | 0,6679  |
| <b>20</b>  | 0,0304  | 4,4696   | 0,0589  | 0,9949  |
| <b>21</b>  | 0,0296  | 2,5352   | 0,0857  | 0,9977  |
| <b>22</b>  | 0,0285  | 4,9700   | 0,0931  | 0,9072  |
| <b>23</b>  | 0,0309  | 3,5639   | 0,1179  | 0,9804  |
| <b>24</b>  | 0,0260  | 5,0344   | 0,0909  | 0,8724  |
| <b>25</b>  | 0,0301  | 3,6374   | 0,0978  | 0,7058  |

**Anexo 6** - Descrição Granulométrica dos sedimentos – adaptado de (Wentworth, 1922) e João M. Alveirinho Dias, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade do Algarve

| φ  | Português                | Inglês             | mm     |
|----|--------------------------|--------------------|--------|
| -9 | Bloco                    | Boulder            | 512    |
| -8 |                          |                    | 256    |
| -7 | Seixo                    | Cobble             | 128    |
| -6 |                          |                    | 64     |
| -5 |                          |                    | 32     |
| -4 | Cascalho muito grosseiro | Very coarse gravel | 16     |
| -3 | Cascalho grosseiro       | Coarse gravel      | 8      |
| -2 | Cascalho médio           | Medium gravel      | 4      |
| -1 | Cascalho fino            | Fine gravel        | 2      |
| 0  | Areia muito grosseira    | Very coarse sand   | 1,000  |
| 1  | Areia grosseira          | Coarse sand        | 0,500  |
| 2  | Areia média              | Medium sand        | 0,250  |
| 3  | Areia fina               | Fine sand          | 0,125  |
| 4  | Areia muito fina         | Very fine sand     | 0,0625 |
| 5  | Silte grosseiro          | Coarse silt        | 31,25  |
| 6  | Silte médio              | Medium silt        | 15,63  |
| 7  | Silte fino               | Fine silt          | 7,81   |
| 8  | Silte muito fino         | Very fine silt     | 3,91   |
| 9  | Argila grosseira         | Coarse clay        | 1,95   |
| 10 | Argila média             | Medium clay        | 0,98   |
| 11 | Argila fina              | Fine clay          | 0,49   |
| 12 | Argila muito fina        | Very fine clay     | 0,24   |
| 13 | Colóides                 | Colloid            | 0,12   |

**Anexo 7** - Perda de Solo Média Anual estimada para cada sub-bacia para *Threshold* =10m<sup>3</sup>/s

| Sub-Bacias | Perda de Solo<br>(toneladas/km <sup>2</sup> /ano) |
|------------|---------------------------------------------------|
| TAM 1      | 32,391                                            |
| TAM 2      | 11,783                                            |
| TAM 3      | 13,296                                            |
| TAM 4      | 6,748                                             |
| TAM 5      | 9,190                                             |
| TAM 6      | 30,460                                            |
| TAM 7      | 4,845                                             |
| TAM 8      | 0,000                                             |
| TAM 9      | 15,347                                            |
| TAM 10     | 8,410                                             |
| TAM 11     | 13,679                                            |
| TAM 12     | 18,671                                            |
| TAM 13     | 28,656                                            |
| TAM 14     | 12,826                                            |
| TAM 15     | 8,883                                             |
| TAM 16     | 39,433                                            |
| TAM 17     | 36,963                                            |
| TAM 18     | 32,057                                            |
| TAM 19     | 11,646                                            |
| TAM 20     | 29,468                                            |
| TAM 21     | 14,735                                            |
| TAM 22     | 53,743                                            |
| TAM 23     | 41,759                                            |
| TAM 24     | 35,597                                            |
| TAM 25     | 4,739                                             |
| Σ          | 515,325                                           |