

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente

Modelação da Poluição Difusa em Águas Superficiais

Por

Davide Manuel Gonçalves dos Santos

**Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Sanitária.**

Orientador : Prof. Amílcar Ambrósio

Lisboa

2000

Aos meus filhos,
Gonçalo e André.

Agradecimentos

Gostaria de endereçar os meus agradecimentos ao meu orientador, Prof. Amílcar Ambrósio, pelo apoio e orientação prestados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, o qual muito contribuiu para o seu enriquecimento.

Gostaria de agradecer à direcção da Área Departamental de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve por me ter apoiado na frequência deste mestrado.

Aproveito ainda para agradecer à Célia Veiga pela ajuda na revisão do texto e ao Prof. Teixeira da Costa por todo o apoio, colaboração e incentivo.

Por fim, gostaria de agradecer a todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho analisa o fenómeno da poluição difusa em águas superficiais e apresenta metodologias para a sua modelação partindo do princípio de que este é desencadeado em grande medida pela chuva.

De forma a determinar a aplicabilidade de cada uma das diferentes metodologias para a modelação do fenómeno, estas são objecto de análise comparativa nomeadamente em termos de exigência de dados, complexidade e nível de erro nos resultados finais.

Com base em formulação que permita uma fácil determinação do transporte de poluentes devido ao escoamento superficial, pretende-se definir as bases para um modelo integrado para o planeamento e gestão dos recursos hídricos superficiais de uma bacia hidrográfica.

Abstract

This work analyse nonpoint source pollution phenomena in surface waters and presents modelation methodologies assuming that rain is its major cause.

Different methodologies for the modelation of the phenomena are discussed relatively to its data demanding, complexity and results error in order to identify each one applicability.

Based on formulation that allows an easy determination of the pollutants transport due to surface runoff, it is pretended with this work to define the basis for an integrated planning and management model for the surface hydric resources of a catchment.

Simbologia

2 - Poluição difusa

- C_{p1} - factor de técnica cultural ponderado.
- C_{p2} - factor de técnica cultural ponderado.
- LS_c - factor fisiográfico com terraços.
- LS_s - factor fisiográfico sem terraços.
- R_A - redução da erosão.

3 - Modelação da poluição difusa

- $\forall$ - volume.
- δ_i - parâmetro.
- λ_i - distância entre o topo da encosta e a extremidade jusante do troço (i).
- ρ_s - massa volúmica das partículas do solo.
- ρ_{solo} - massa volúmica do solo.
- θ - coeficiente.
- θ_0 - teor de humidade do solo antes da ocorrência da chuva.
- $(\%)MO$ - percentagem de matéria orgânica.
- $(\%areia)_e$ - percentagem de areia nos sedimentos.
- $(\%areia)_m$ - percentagem de areia no solo.
- $(\%argila)_e$ - percentagem de argila nos sedimentos.
- $(\%argila)_m$ - percentagem de argila no solo.
- $(\%silte)_e$ - percentagem de silte nos sedimentos.
- $(\%silte)_m$ - percentagem de silte no solo.
- a - parâmetro.
- $areia.fina(\%)$ - percentagem de areia fina.
- $areia.grossa(\%)$ - percentagem de areia grossa.
- $argila(\%)$ - percentagem de argila.

- b - parâmetro.
- c - parâmetro.
- c - factor de arrastamento de poluentes.
- f_X - fracção de poluente relativamente ao solo.
- f_{X0} - concentração de poluente no solo.
- f_{XR} - concentração de poluente no escoamento.
- f_{TF} - fracção de terra fina.
- h_i - altura de chuva no intervalo i .
- k - factor de migração do poluente para a superfície.
- $limo(\%)$ - percentagem de limo.
- n - porosidade.
- n - número de ordem da bacia hidrográfica.
- p - classe de permeabilidade do solo.
- q - caudal máximo escoado.
- r - taxa de escoamento por unidade de área.
- s - classe de estrutura do solo.
- t - tempo.
- $t_{0,5}$ - meia vida.
- w - factor que representa a remoção de poluente.
- w - velocidade de reacção.
- w_{20} - velocidade de reacção à temperatura de 20 °C.
- y - factor de lavagem do poluente para a superfície.
- z - cota da camada de solo.
- Δt - variação de tempo.
- $\Delta \theta$ - variação do teor em água no solo.
- A - área da bacia hidrográfica.
- A - erosão.
- A - deposição atmosférica por via seca.
- A_b - área da bacia hidrográfica.
- A_p - massa de sedimentos produzidos.
- C - factor de cultivo.

- C - concentração média do poluente.
- C_0 - concentração inicial de poluente.
- C_{ps} - coeficiente de produção de sedimentos.
- C_s - concentração absorvida e/ou adsorvida na superfície do solo.
- C_t - concentração de poluente no tempo t .
- C_w - concentração na água.
- C_E - coeficiente de enriquecimento.
- C_P - condição do pavimento da estrada.
- CR_e - coeficiente de argila dos sedimentos.
- CR_m - coeficiente de argila do solo.
- D_T - densidade de tráfego.
- E - energia da chuva.
- E_c - energia cinética da chuva.
- E_T - taxa de emissão pelo tráfego.
- H - altura do passeio.
- H_b - máxima amplitude de cotas entre a cabeceira e a secção de referência da bacia hidrográfica.
- I - infiltração.
- I - entrada de poluente.
- I - deposição de poluente no passeio.
- I_{30} - intensidade máxima de chuva ocorrida na chuvada durante 30 minutos.
- I_i - intensidade pluviométrica no intervalo i .
- I_A - deposição atmosférica de poluente.
- I_L - deposição devido ao lixo.
- I_T - deposição pelo tráfego.
- K - factor de erodibilidade do solo.
- K_d - coeficiente de distribuição ou adsorção.
- L - deposição de lixo.
- L - factor de longitude.
- L_b - comprimento da linha de água.
- L_R - largura da rua.

- LS - factor fisiográfico.
- M - parâmetro que define o tamanho das partículas do solo.
- N_1 - número de linhas de água de primeira ordem.
- P - massa de poluente disponível para ser transportada.
- P - factor de conservação.
- P - precipitação.
- P_0 - massa inicial de poluentes.
- P_c - factor de contorno.
- P_{eq} - ponto de equilíbrio.
- $P_{particulado}$ - massa particulada de poluente disponível para ser transportado.
- P_s - factor de de cultivo em faixa.
- $P_{soluvel}$ - massa solúvel de poluente disponível para ser transportado.
- P_t - factor de sedimentação em terraço.
- Q - volume escoado.
- Q_m - caudal médio.
- R - excesso hídrico.
- R - índice de erosividade.
- R_b - razão de bifurcação da rede de drenagem da bacia hidrográfica.
- R_r - índice de erosividade da chuva.
- R_t - coeficiente de retardamento.
- S - factor de inclinação.
- SS_e - superfície específica dos sedimentos.
- SS_m - superfície específica do solo.
- V_{R1} - velocidade de migração do poluente de $R_t = 1$.
- V_{Rn} - velocidade de migração do poluente de $R_t = n$.
- V_T - velocidade de tráfego.
- V_V - velocidade do vento.
- X - concentração de poluente disponível para ser arrastado.
- X_0 - concentração inicial de poluente existente na camada de solo.

4 - Modelação do escoamento

- α - coeficiente.
- r - intensidade de precipitação.
- t_p - tempo que decorre até à saturação do solo.
- CN - número de escoamento.
- $CN(I)$ - número de escoamento para condições de humidade AMCI.
- $CN(II)$ - número de escoamento para condições de humidade AMCII.
- $CN(III)$ - número de escoamento para condições de humidade AMCIII.
- F - infiltração real.
- K - condutividade saturada do solo.
- I_a - abstracção inicial.
- P - precipitação.
- P_e - escoamento potencial.
- Q - precipitação efectiva.
- S - infiltração potencial.
- S_f - factor de sucção do solo.
- S_p - factor de sorptividade do solo.
- W_p - infiltração ocorrida até à saturação do solo.

5 - Método de Monte Carlo

- λ - média da população $\ln X$.
- $\mu_{\ln X}$ - média da população $\ln X$.
- μ_X - média da população X .
- $\sigma_{\ln X}$ - desvio padrão da população $\ln X$.
- σ_X - desvio padrão da população X .
- ξ - desvio padrão da população $\ln X$.
- $f(X)$ - função densidade da população X .
- n - número da amostra.
- s - desvio padrão da amostra da população X .

- t_p - valor dos percentis da distribuição t de Student.
- $\bar{x}_N$ - média da amostra da população X.
- Me_X - mediana da população X.
- Mo_X - moda da população X.
- $S_{n(n-1)}$ - desvio padrão da amostra.
- X - valor.
- $\bar{X}_N$ - média da população X.
- $F(X)$ - função distribuição da população X.
- Z - variável reduzida.

6 - Proposta de um modelo

- $\forall_i$ - volume escoado na secção de referência da sub-bacia(i).
- δ_j - parâmetro de correcção.
- λ_i - comprimento da linha de água principal da sub-bacia(i).
- λ_j - comprimento da linha de água principal da sub-bacia(i).
- $\lambda_{(j-1)}$ - comprimento da linha de água principal da sub-bacia(i).
- b - largura das linhas de água.
- c_i - coeficiente de arrastamento de poluentes da célula (i).
- m_j - parâmetro (m) do troço (j).
- $m_{(j-1)}$ - parâmetro (m) do troço (j-1).
- n - número de células afluentes.
- n - número de células pela qual é formada a sub-bacia(i).
- A_i - erosão na sub-bacia (i).
- $(A_b)_i$ - área da sub-bacia(i).
- $(A_p)_i$ - quantidade de sedimentos produzidos na sub-bacia(i).
- C_i - concentração média de poluentes que sai da sub-bacia(i).
- C_i - factor de técnica de cultivo da sub-bacia(i).
- C_i^j - factor de técnica de cultura da célula (j) da sub-bacia (i).
- $(C_{ps})_i$ - coeficiente de produção de sedimentos da sub-bacia(i).
- $(I_a)_i$ - abstracção inicial da célula (i).

- CN_i - número de escoamento da célula (i).
- K_i - factor de erodibilidade do solo da sub-bacia(i).
- K_i^j - factor de erodibilidade da célula (j) da sub-bacia(i).
- LS_i - factor fisiográfico da sub-bacia(i).
- Q_i^j - chuva efectiva na célula (i).
- Q_e - caudal.
- P_i - factor de prática de conservação da sub-bacia(i).
- P_i^j - factor de prática de conservação da célula (j) da sub-bacia(i).
- P_i^j - precipitação na célula (i).
- $(P_0)_i$ - massa de poluente inicial disponível para ser arrastada na célula (i).
- $(P_a)_i^j$ - massa de poluente que entra na célula (i) de células afluentes (j=1...n).
- $(P_e)_i$ - massa de poluente que sai da célula (i).
- R_i - excesso hídrico gerado na célula (i).
- R_i - factor de erosividade da precipitação.
- $(S_f)_i$ - factor de sucção na célula (i).
- S_i - infiltração potencial na célula (i).
- S_j - factor de declive relativo ao troço (j).
- $(S_p)_i$ - sorptividade do solo na célula (i).

8 - Ribeira da Meia Léguas

- a - constante que depende do período de retorno.
- b - constante que depende do período de retorno.
- r - coeficiente de subida.
- t - tempo.
- I - intensidade de precipitação.
- T_a - tempo de subida do hietograma.
- T_d - duração da chuvada.

B - Modelação de lagoas de sedimentação

- $\forall$ - volume da lagoa de sedimentação.
- η - eficiência da lagoa.
- η_f - rendimento da lagoa com a descarga de fundo aberta.
- ν - coeficiente de viscosidade cinemática da água.
- ν_m - viscosidade cinemática da mistura.
- ω - velocidade de sedimentação das partículas.
- g - aceleração da gravidade.
- b - largura do canal de aproximação.
- h - altura média da lagoa.
- h - altura do escoamento no canal de aproximação.
- k - coeficiente da taxa de sedimentação.
- n - índice de turbulência utilizado para indicar o comportamento da lagoa.
- n - número de Manning da lagoa.
- q_{se} - massa de sedimentos que sai da lagoa por unidade de tempo.
- q_{si} - massa de sedimentos que entra na lagoa por unidade de tempo.
- t - tempo de retenção.
- u_* - velocidade de arrastamento da partícula no canal de aproximação.
- A - área da lagoa.
- B - largura da lagoa.
- D - altura da lagoa.
- G - densidade das partículas.
- L - comprimento da lagoa.
- Q - caudal de ponta.
- Q_f - descarga de fundo expresso em percentagem do caudal de entrada na lagoa.
- R_d - fracção de sólidos decantados quando a lagoa de sedimentação funciona em condições hidrodinâmicas.
- R_h - raio hidráulico.
- S_f - inclinação da linha de energia que no caso do escoamento em superfície livre em regime uniforme é igual à declividade do canal.
- U - velocidade de escoamento na lagoa.

- T - temperatura da água.

E - Modelo físico de transporte de poluentes

- ρ_b - massa volúmica do solo.
- θ - grau de humidade do solo.
- a - parâmetro que depende das características do solo.
- c - concentração do soluto.
- f - factor de resistência de Darcy-Weisbach.
- k - coeficiente de permeabilidade intrínseca do solo.
- t - tempo.
- v - velocidade de escoamento.
- v_1 - velocidade da água nos poros.
- z - distância na camada de solo.
- D - coeficiente de dispersão.
- D_0 - coeficiente de difusão molecular do poluente.
- E - coeficiente de arrastamento.
- I - taxa de infiltração.
- K_d - coeficiente de distribuição.
- P_* - número de *Peclet*.
- R - coeficiente de retardamento.

F - Modelo físico de transporte de sedimentos

- ∂ - largura da célula.
- α - inclinação do solo.
- γ - peso volúmico da água.
- ρ_d - massa volúmica do solo.
- τ - tensão de arrastamento que actua no solo.
- τ_c - tensão crítica de arrastamento.
- *areia* - fracção de areia no solo.

- *argila* - fracção de argila no solo.
- *h* - altura de escoamento.
- *h_s* - porção da carga hidráulica que actua sobre os sedimentos.
- *mo* - fracção de matéria orgânica no solo.
- *n* - coeficiente de Manning para solo liso.
- *n_s* - coeficiente de Manning para solo com a cobertura natural.
- *q* - caudal por unidade de largura.
- *r* - intensidade de precipitação.
- *raizes10* - massa de raízes nos primeiros 10 cm de solo.
- *s* - concentração de sedimentos.
- *t* - tempo.
- Θ - parâmetro.
- *C* - coeficiente de técnica de cultivo (USLE).
- *D_c* - capacidade de arrastamento nas linhas de água.
- *E_I* - erosão entre linhas de água.
- *E_R* - erosão nas linhas de água.
- *K* - coeficiente de erodibilidade do solo (USLE).
- *K_r* - parâmetro de erodibilidade em linhas de água.
- *K_T* - coeficiente da capacidade de transporte.
- *Q_{out}* - caudal que sai da célula.
- *S_f* - inclinação da linha de energia.
- *T_c* - capacidade de transporte do escoamento.
- *V_s* - velocidade de sedimentação das partículas.
- *W_s* - massa de sedimentos que entra na célula.

G - Modelo de onda cinemática

- α - parâmetro.
- β - parâmetro.
- j - perda de carga.
- n - coeficiente de Manning.
- q - entrada lateral de caudal.
- t - tempo.
- x - espaço.
- A - área da secção molhada.
- Q - caudal.
- S_0 - inclinação do talvegue.
- S_f - inclinação da linha de energia.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Poluição difusa	4
2.1	Causas e origens da poluição difusa	5
2.1.1	Origem atmosférica	6
2.1.2	Origem urbana	6
2.1.2.1	Sólidos suspensos	7
2.1.2.2	Carência de oxigénio	8
2.1.2.3	Óleos e gorduras	8
2.1.2.4	Nutrientes	9
2.1.2.5	Metais	9
2.1.2.6	Microbiologia	10
2.1.2.7	Sólidos flutuantes	10
2.1.2.8	Outras substâncias tóxicas	10
2.1.3	Origem agrícola	11
2.1.3.1	Sólidos suspensos	11
2.1.3.2	Carência de oxigénio	12
2.1.3.3	Nutrientes	12
2.1.3.4	Pesticidas	13
2.1.3.5	Microbiologia	13
2.2	Acção da precipitação	14
2.3	Legislação aplicada	15
2.4	Controlo da poluição difusa	20
2.4.1	Controlo indirecto	20
2.4.2	Controlo directo	20
2.4.2.1	Controlo directo a nível macro	20
2.4.2.2	Controlo directo a nível micro	21
2.4.3	Sistemas de controlo na fonte (CF)	21
2.4.4	Sistemas de modificação hidrológica (MH)	23
2.4.5	Sistemas e controlo de emissão (CE)	23
2.4.6	Sistemas de tratamento (T)	23
3	Modelação da poluição difusa	27
3.1	Quantificação dos poluentes	27
3.1.1	A observação	27
3.1.1.1	Parâmetros e dados a medir e recolher	28
3.1.2	A modelação	29
3.1.2.1	Modelos empíricos ou estatísticos	29
3.1.2.2	Modelos determinísticos ou físicos	29
3.1.2.3	Modelos conceptuais	30
3.1.2.4	Abordagem IMR na modelação da poluição difusa	30

3.2	Modelação do transporte de poluentes	31
3.2.1	Determinação de c e P_0 em campo.	33
3.2.1.1	Exemplos de aplicação	34
3.2.2	Determinação da carga inicial de poluentes em áreas permeáveis	35
3.2.2.1	Coeficiente de enriquecimento de sedimentos (C_E)	42
3.2.2.2	Coeficiente de enriquecimento de matéria orgânica (C_{Emo})	43
3.3	Modelo exponencial versus modelo físico	43
3.3.1	Exemplo de aplicação	45
3.4	Deposição contínua de poluentes	46
3.4.1	Deposição de poluentes em zonas urbanas	46
3.4.2	Deposição de poluentes em zonas rurais	48
3.5	Modelação da erosão	49
3.5.1	Índice de erosividade da chuva (R)	50
3.5.1.1	Modificações no índice de erosividade (R)	51
3.5.2	Factor de erodibilidade do solo (K)	51
3.5.3	Factor de longitude (L) e de inclinação (S)	52
3.5.4	Factor de técnica cultural (C)	54
3.5.5	Factor de prática de conservação do solo (P)	54
3.6	Produção de sedimentos	55
4	Modelação do escoamento	57
4.1	Modelação da bacia hidrográfica	57
4.1.1	Definição do sentido do escoamento	57
4.2	Determinação da precipitação efectiva	60
4.2.1	Abstracção inicial	63
4.2.2	Classificação do solo	65
5	Método de Monte Carlo	69
5.1	Leis de distribuição	71
5.1.1	Lei normal ou Gausseana, $N(\mu, \sigma)$	71
5.1.1.1	Função distribuição	71
5.1.1.2	Função densidade	71
5.1.1.3	Moda	71
5.1.1.4	Mediana	71
5.1.1.5	Média	71
5.1.1.6	Desvio padrão	71
5.1.2	Lei lognormal, $LN(\lambda, \xi)$	71
5.1.2.1	Função distribuição	71
5.1.2.2	Função densidade	72
5.1.2.3	Moda	72
5.1.2.4	Mediana	72
5.1.2.5	Média	72
5.1.2.6	Desvio padrão	72
5.2	Estabelecimento dos valores do modelo	72
5.2.1	Dados de campo	73
5.2.2	Dados bibliográficos	73
6	Proposta de um modelo	74
6.1	Escoamento	74
6.2	Geração e transporte de poluentes	75
6.2.1	Zonas rurais - desenvolvimentos futuros	76

6.2.2	Zonas urbanas - desenvolvimentos futuros	77
6.3	Erosão	78
6.3.1	Índice de erosividade da chuva - R	79
6.3.2	Factor de erodibilidade do solo - K	79
6.3.3	Factor fisiográfico - LS	79
6.3.4	Factor de técnica cultural - C	80
6.3.5	Factor de prática de conservação - P	80
6.4	Transporte de sedimentos	80
6.5	Monte Carlo	81
6.6	Desenvolvimentos futuros no modelo	81
7	Calibração do modelo	83
7.1	Obtenção dos dados	83
7.1.1	Durante o fenómeno hidrológico	83
7.1.2	Antes e depois do fenómeno hidrológico	84
7.2	Tratamento dos dados	85
7.3	Análise dos resultados	85
8	Ribeira da Meia Léguas	86
8.1	Caracterização da bacia hidrográfica	86
8.2	Recolha de dados	88
8.3	Definição do hietograma	90
8.4	Valores gerados pelo modelo	93
8.5	Calibração	96
9	Considerações finais	103
A	Poluição Difusa - Anexos	111
B	Modelação de lagoas de sedimentação	115
B.1	Metodologia proposta por Fair & Geyer (1954)	115
B.2	Metodologia proposta por Raju <i>et al.</i> (1999)	116
B.3	Metodologia para o dimensionamento de lagoas de sedimentação	118
C	Modelação da poluição difusa - anexos	119
D	Modelação do escoamento - anexos	124
E	Modelo físico de transporte de poluentes	127
F	Modelo físico de transporte de sedimentos	130
G	Modelo de onda cinemática	133
G.1	Apresentação do modelo	133
G.2	Resolução numérica	134
G.2.1	Esquema linear da equação de onda cinemática	134
G.2.2	Esquema não linear da equação de onda cinemática	134
G.3	Aplicação do modelo a uma bacia hidrográfica	136
H	Ribeira da Meia Léguas - dados	137
I	Ribeira da Meia Léguas - resultados	142

J	Código do modelo - Fortran 90	158
J.1	bacia.f90	158
J.2	balpol.f90	160
J.3	balsed.f90	163
J.4	diversos.f90	165
J.5	escoamento.f90	167
J.6	estatistica.f90	170
J.7	ficheiros.f90	181
J.8	montecarlo.f90	186
J.9	MPDifusa.f90	190
J.10	no1no2.f90	192
J.11	ordemtroco.f90	204
J.12	Roehl.f90	207
J.13	scs.f90	209
J.14	transp_poluentes.f90	211
J.15	transp_sedimentos.f90	212
J.16	usle.f90	213
J.17	Wanielista.f90	218
J.18	Modelo de Onda Cinemática - Código	219
	J.18.1 hidrocinemática.f90	219
	J.18.2 caudal.f90	225

Lista de Figuras

3.1	Dados relativos ao transporte de chumbo numa chuvada, a partir de seis amostragens no escoamento superficial.	34
3.2	Migração do poluente para a superfície em função do coeficiente de retardamento (R_t).	41
3.3	Modelo de quantificação da massa inicial de poluente disponível para ser lixiviada pelo escoamento superficial.	42
3.4	Modelo exponencial ajustado ao modelo físico.	46
3.5	Nomograma para a determinação do factor de erodibilidade do solo (K) . .	52
3.6	Classificação do solo quanto à sua permeabilidade	53
4.1	Topografia da bacia hidrográfica.	58
4.2	Sentidos do escoamento.	58
4.3	Sentidos do escoamento na bacia hidrográfica.	59
4.4	Balanço de massas por célula na determinação dos volumes de escoamento e transporte de poluentes.	60
4.5	Rede de drenagem da bacia hidrográfica e classificação do número de ordem das linhas de água.	61
4.6	Classificação da textura do solo de acordo com o SCS	67
4.7	Classificação dos diferentes tipos de solo (A,B,C,D).	68
6.1	Esquema da drenagem em zona urbana com rede pluvial, com poços e uma fonte.	78
8.1	Representação tridimensional da bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua. .	86
8.2	Planta da bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua.	87
8.3	Classes de ocupação do solo na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua. .	91
8.4	Hietograma adimensional para uma chuva de 60 minutos.	94
8.5	Rede de drenagem gerada pelo modelo.	97
8.6	Relação entre a precipitação e o escoamento na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua e respectivos tempos de retorno.	98
8.7	Relação entre o escoamento e a massa de poluente transportada na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua e respectivos tempos de retorno. . .	99
8.8	Relação entre o escoamento e a concentração média de poluente transportado na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua e respectivos tempos de retorno.	100
8.9	Relação entre o escoamento e a massa de sedimentos transportados na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua e respectivos tempos de retorno. . .	101
8.10	Relação entre o escoamento e a concentração de sedimentos transportados na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua e respectivos tempos de retorno.	102
G.1	Esquema linear para a resolução do modelo de onda cinemática.	135

I.1	Simulação do azoto total para 100, 500, 1 000, 2 000 e 3 000 variáveis aleatórias	143
I.2	Simulação do azoto total para 100 variáveis aleatórias	144
I.3	Simulação do azoto total para 500 variáveis aleatórias	145
I.4	Simulação do azoto total para 1 000 variáveis aleatórias	146
I.5	Simulação do azoto total para 2 000 variáveis aleatórias	147
I.6	Simulação do azoto total para 3 000 variáveis aleatórias	148
I.7	Simulação dos sedimentos para 100, 500, 1 000, 2 000 e 3 000 variáveis aleatórias	149
I.8	Simulação dos sedimentos para 100 variáveis aleatórias	150
I.9	Simulação dos sedimentos para 500 variáveis aleatórias	151
I.10	Simulação dos sedimentos para 1 000 variáveis aleatórias	152
I.11	Simulação dos sedimentos para 2 000 variáveis aleatórias	153
I.12	Simulação dos sedimentos para 3 000 variáveis aleatórias	154
I.13	Simulação do azoto total e sedimentos em nove células para 300 000 variáveis aleatórias.	155
I.14	Simulação do azoto total em nove células para 300 000 variáveis aleatórias.	156
I.15	Simulação dos sedimentos em nove células para 300 000 variáveis aleatórias.	157

Lista de Tabelas

3.1	Classes de permeabilidade	53
3.2	Classes de estrutura	53
3.3	Factor de contorno - P_c	55
4.1	Valores da abstracção inicial (I_a) em função do número de escoamento (CN) e a intensidade pluviométrica (r).	64
4.2	Componentes do solo	66
4.3	Classificação dos diferentes tipos de solo quanto à textura.	66
8.1	Característica e ocupação da bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua .	88
8.2	Valores de coeficientes de subida de tempestade em vários locais.	92
8.3	Intensidades de precipitação por tempo de retorno para chuvas com a duração de 60 minutos	92
8.4	Determinação do hietograma adimensional associado a uma chuvada de 60 minutos com um coeficiente de subida de ($T_d = 1$ h, $r = 0,333$).	93
A.1	Contribuição da poluição pontual e difusa nos Estados Unidos	111
A.2	Carga de poluentes atribuídos a pecuária.	111
A.3	Persistência de alguns pesticidas	112
A.4	Concentração de metais pesados nos sedimentos	112
A.5	Deposição de sedimentos nas ruas pelo tráfego	112
A.6	Concentração média de poluentes nas águas de escorrência	113
A.7	Valores indicativos da composição da água da chuva	113
A.8	Poluição contida nos sedimentos	113
A.9	Remoção de poluentes por sedimentação	113
A.10	Tempo para remover 60 % dos sólidos suspensos a 1,2 m de profundidade .	113
A.11	Massa de poluente por massa de sedimentos	114
A.12	Cargas anuais de poluentes escoadas de zona agrícola e urbana	114
C.1	Taxa de transporte de poluentes	119
C.2	Factores de cultivo (C) mais comuns em Portugal	120
C.3	Factores de técnica cultural (C) - áreas artificiais	120
C.4	Factores de técnica cultural (C) - terras aráveis (Culturas Anuais)	121
C.5	Factores de técnica cultural (C) - culturas permanentes	121
C.6	Factores de técnica cultural (C) - prados permanentes	121
C.7	Factores de técnica cultural (C) - áreas agrícolas heterogéneas	122
C.8	Factores de técnica cultural (C) - territórios agro-florestais	122
C.9	Factores de técnica cultural (C) - floresta	122
C.10	Factores de técnica de cultural (C) - meios semi-naturais	122
C.11	Factores de técnica cultural (C) - meios aquáticos	123
C.12	Factores de técnica cultural (C) - superfícies com água	123
C.13	Factores de prática de conservação do solo (P)	123

D.1	Valores de número de escoamento para zonas rurais	125
D.2	Valores de número de escoamento para zonas urbanas	126
H.1	Aac - aluviosolos modernos calcários de textura pesada	137
H.2	Ass - solos salinos de salinidade elevada de aluviões de textura mediana . .	138
H.3	Et - litossolos esqueléticos de arenitos	138
H.4	Pc - solos calcários pardos de calcários não compactos	138
H.5	Rg - regossolos psamíticos não húmidos.	139
H.6	Rgc - regossolos psamíticos não húmidos cultivados.	139
H.7	Vc - solos calcários vermelhos de climas mediterrânicos de calcários. . . .	140
H.8	Vcd - solos mediterrâneos vermelhos ou amarelos de calcáreos compactos ou dolomias.	140
H.9	Vt - solos litólitos não húmicos de arenitos.	140
H.10	Et - litossolos (solos esqueléticos) de arenitos (Et).	141

Capítulo 1

Introdução

A gestão da poluição pontual ou difusa no meio hídrico superficial deve ser encarada no interior da linha de cumeada que forma uma bacia hidrográfica, e não ao nível dos limites administrativos de uma freguesia, concelho, distrito ou país.

Qualquer intervenção num determinado local tem implicações em toda a bacia hidrográfica; sendo assim, a definição de estratégias de gestão ou de planeamento deve ser feita considerando a unidade bacia hidrográfica.

A previsão dos impactes que determinadas estratégias ou práticas de gestão de bacia hidrográfica possam ter ao nível da poluição hídrica superficial encontram nos modelos matemáticos calibrados a ferramenta mais adequada, onde diversos cenários podem ser testados e avaliados. Só assim é possível tomar decisões que possam acarretar menor risco para o meio hídrico, e logo, para a saúde pública.

No momento em que os problemas associados às fontes de poluição pontual começam a estar controlados, os de poluição difusa ganham importância relativa. Estes, são de resolução mais difícil e de igual capacidade de poluição dos meios hídricos. A dificuldade da sua quantificação e controlo está associada à sua natureza dispersa no espaço e no tempo.

Usualmente a poluição difusa está associada ao fenómeno hidrológico da precipitação. O seu efeito é tão mais importante quanto maior for o período de estiagem que antecede o referido fenómeno.

Associada ao factor precipitação existe ainda a incerteza do comportamento do composto em solubilizar-se (parcela solúvel) ou em adsorver-se às partículas de sedimento em suspensão na água (parcela particulada). Quanto à parcela particulada, a sua importância aumenta com a diminuição do diâmetro das partículas em suspensão, *i.e.*, quanto mais pequenas forem estas partículas maior propensão das substâncias para se adsorverem.

Pretende-se neste trabalho, propor as bases para o desenvolvimento de um modelo de poluição difusa que seja equilibrado relativamente à exigência de dados, complexidade e erro dos resultados. Este trabalho tem como objectivo, não a apresentação final de um modelo, mas sim definir as orientações para o seu desenvolvimento.

Podemos referir que existem duas abordagens possíveis para a análise de modelos de poluição difusa :

- De quem desenvolve.

- De quem utiliza.

Pretende-se neste trabalho apresentar o primeiro ponto de vista, abordando diversas possibilidades de modelação e discutindo as vantagens e inconvenientes de cada uma.

É de referir ainda que neste projecto se pretende apresentar uma abordagem discreta, *i.e.*, propondo-se metodologias para determinar a poluição difusa resultante de uma ou de uma sucessão de fenómenos hidrológicos. Não foi considerada a abordagem da quantificação associada a valores médios mensais ou anuais, embora as metodologias propostas possam-nos dar estes valores, se analisarmos o fenómeno como uma sucessão de acontecimentos de natureza discreta (*e.g.*: chuvas) e contínua (*e.g.* : evapotranspiração).

A análise da poluição difusa com base em valores médios dificulta a quantificação do choque que determinados fenómenos hidrológicos provocam no meio hídrico superficial, além do facto da integração destes valores em modelos de qualidade da água, ser menos realista.

A dissertação é composta pelos seguintes capítulos :

Poluição Difusa - neste capítulo é feita a caracterização geral do fenómeno da poluição difusa. Nele é abordada a poluição difusa de origem urbana e agrícola associada a poluentes, como: sólidos suspensos; carência de oxigénio; óleos e gorduras; nutrientes; metais; microbiologia; sólidos flutuantes; pesticidas e outras substâncias tóxicas. São também apresentadas algumas propostas de sistemas controlo e tratamento das águas resultantes do escoamento superficial.

Modelação da Poluição Difusa - neste capítulo é abordada a problemática da modelação da poluição difusa. São apresentadas formulações que permitem determinar a poluição difusa de origem rural e urbana, dissolvida e particulada, assim como o fenómeno da erosão.

Modelação do Escoamento - o escoamento é o objecto de estudo deste capítulo como motor do transporte de poluentes; nele é apresentada a metodologia para a modelação do excesso hídrico associado a uma precipitação a integrar na modelação da poluição difusa.

Método de Monte Carlo - face à incerteza associada ao fenómeno da poluição difusa, é proposta uma metodologia de abordagem do problema com base no método de Monte Carlo. Neste capítulo é feita a análise do método a partir de dados de campo ou de bibliografia.

Proposta de um Modelo - no âmbito deste trabalho foi desenvolvido um programa que permite demonstrar a metodologia proposta. A versão apresentada corresponde a um primeiro passo para o desenvolvimento de um programa que permita a modelação da poluição difusa e pontual numa bacia hidrográfica de uma forma integrada. Neste capítulo é apresentada a formulação que o programa desenvolvido contém. São feitas referências às suas limitações e aos possíveis desenvolvimentos para o futuro.

Calibração do Modelo - para a alimentação do modelo são necessários dados de entrada; estes podem ser obtidos em bacias hidrográficas piloto e os valores resultantes extrapolados para outros locais. Neste capítulo é feita referência a uma possível metodologia a adoptar na obtenção dessa informação. Pretende-se aqui a criação de uma base de dados

de valores de entrada, que permita a aplicação do modelo de poluição difusa em qualquer bacia hidrográfica sem grande instrumentação da mesma.

Ribeira da Meia Léguas - aplicação do programa desenvolvido à bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas com base em valores de bibliografia. É feita referência a uma metodologia de calibração. Esta metodologia pretende o ajustamento do modelo a uma bacia hidrográfica concreta, tendo como dados de partida, os obtidos de acordo com o proposto no capítulo anterior.

Considerações Finais - são feitas referências a estudos e a futuros desenvolvimentos do modelo de poluição difusa proposto.

Para concluir é importante referir como limitação no desenvolvimento destes trabalho, a inexistência de dados de campo que permitissem a validação das formulações propostas. Refira-se no entanto, que a grande maioria das mesmas já foram validadas por outros autores. Tal como já foi referido anteriormente, o programa desenvolvido foi testado com dados bibliográficos.

Capítulo 2

Poluição difusa

De acordo com a proposta da Directiva Quadro [51, 52, 53, 54, 55] entende-se por poluição : A introdução directa ou indirecta, de substâncias ou calor no ar, água ou terra, como resultado da actividade humana, as quais possam ser prejudiciais para a saúde humana ou para a qualidade dos ecossistemas aquáticos ou ecossistemas terrestres que dependam destes, o que por sua vez resultem em prejuízos para bens materiais ou prejudiquem ou interferiram com o valor natural ou com outras utilizações legítimas do ambiente.

O conceito de poluição aplicado à água é definido pelo U.S. Congress (1987) *in* Novotny [46] como toda a alteração química, física, biológica e radiológica da integridade da água provocada ou induzida pelo homem.

Podemos definir como poluição difusa a introdução indirecta de substâncias ou calor no ar, água ou terra, como resultado da actividade humana de forma dispersa e variável no espaço e no tempo, não podendo ser atribuída a uma origem pontual.

De acordo com Novotny [46], as fontes difusas são de difícil quantificação devido à sua grande variabilidade e dificuldade de identificação, chegando a ser complexo separá-las da qualidade natural da água. Distinguem-se das fontes pontuais as quais são facilmente identificáveis e medidas.

A importância do estudo e quantificação desta forma de poluição prende-se com o seu crescente peso na poluição total (traduzindo-se esta pelo somatório da poluição difusa e pontual). No quadro (A.1) (pag. 111) podemos ver que nos Estados Unidos da América a grande percentagem de poluição ligada a determinados poluentes (*e.g.* : CQO¹, PT², TKN³, CF⁴, Zn⁵, Pb⁶) está associada a fontes difusas. Quer isto dizer, que para se atingirem determinados níveis de qualidade da água no meio, não basta o controlo da poluição pontual.

Esta ideia é reforçada por Castro [13] que refere que a poluição difusa tem vindo a ser considerada, em países como os Estados Unidos como o principal factor impeditivo do alcance das normas ambientais de qualidade da água, o que significa que tais normas não serão satisfeitas mesmo que controlada a poluição pontual.

¹CQO - Carência Química de Oxigénio

²PT - Fósforo Total

³TKN - Azoto Kjeldahl

⁴CF - Coliformes Fecais

⁵Zn - Zinco

⁶Pb - Chumbo

Delville [23] refere que a descontinuidade do fenómeno de poluição difusa provoca um choque que amplifica o impacto no meio receptor. O autor refere que numa chuvada, uma fracção substancial da média anual pode ser descarregada no meio, podendo atingir os 20 % do total anual.

A identificação da poluição devido à pluviosidade é mais complexa que as descargas das águas residuais urbanas, devido a [23] :

- *Intermitência na transferência dos poluentes* - As descargas fazem-se de uma forma descontínua e aleatória ao longo da ocorrência de pluviosidade.
- *Grande variabilidade qualitativa das descargas* - As concentrações e as cargas de poluentes podem variar entre dois aglomerados, dois escoamentos no mesmo local, ou ao longo dum mesmo escoamento. Entre concentrações médias de descargas de um aglomerado em diversas chuvas foi medida razões da ordem de 40.

Overcash e Novotny *in* Castro [13] referem que as principais características da poluição difusa podem sintetizar-se da seguinte forma :

- As descargas alcançam as águas superficiais de uma forma difusa e em intervalos intermitentes, relacionados, fundamentalmente, com a ocorrência de acontecimentos meteorológicos incontrolláveis. As descargas têm a duração limitada estendendo-se geralmente por algumas horas ou dias. As intensidades das descargas dependem essencialmente dessa duração, do volume de águas pluviais e do período de seca anterior.
- As descargas provêm de uma área extensa, não podendo geralmente ser aferidas no ponto de origem, de difícil definição.

2.1 Causas e origens da poluição difusa

Segundo Novotny [46] as causas da poluição difusa são :

- Aumento da população.
- Ocupação do solo.
 - Desflorestação.
 - Alteração de zonas húmidas.
 - Conversão de solos à agricultura intensiva.
- Urbanização.
 - Condições da bacia hidrográfica durante expansão urbanística.
 - Construção.
- Zonas sem infraestruturas sanitárias.
- Poluição de zonas desenvolvidas, zonas com redes de drenagem de águas residuais e corredores de transportes.
- Mineração.

- Fontes difusas da agricultura e silvicultura.
- Pastagens e zonas de pecuária.

As origens da poluição difusa nas águas superficiais podem ser atribuídas aos seguintes grupos :

- Origem atmosférica.
- Origem urbana.
- Origem agrícola.

2.1.1 Origem atmosférica

As emissões atmosféricas são numerosas. Elas provêm, de entre outras, de actividades industriais, centrais térmicas, escapes de motores de combustão. As chuvas podem fazer cair os poluentes sobre o solo em locais por vezes bastante afastados do local de emissão [23].

A transferência duma parte dessa poluição produz-se por lixiviação ao longo da precipitação [23]. No quadro (A.7)(pag. 113) podemos ver valores indicativos da composição da água da chuva, onde os valores de concentrações de alguns parâmetros são significativos.

2.1.2 Origem urbana

Loerth (1974), Wanielista *et al.* (1977), Guy (1978), Overcash e Davidson (1980), Novotny *et al.* (1985) e Ellis (1986) *in* Castro [13] referem que as fontes urbanas de poluição difusa podem ser analisadas nas suas componentes, cada uma contribuindo com quantidades variáveis de poluentes dissolvidos e em suspensão :

- Deposição atmosférica, seca e húmida, resultante das emissões industriais, de veículos motorizados e de processos naturais, poeiras, pólen e outros resíduos vegetais.
- Erosão do solo e produtos de corrosão de superfícies tais como pneus, ruas, telhados, edifícios e contentores.
- Áreas de construção, incluindo a erosão dos solos expostos, produtos químicos provenientes de combustíveis, solventes e estabilizadores.
- Fossas sépticas, especialmente quando a permeabilidade é reduzida resultando em contaminação superficial ou quando a permeabilidade é demasiado elevada permitindo a contaminação de águas subterrâneas.
- Resíduos urbanos.
- Aditivos químicos, tais como pesticidas, fertilizantes e condicionadores de solo.
- Animais de estimação e selvagens.

Num estudo realizado por Barret [2], sobre a poluição difusa de origem urbana, chegou-se às seguintes conclusões :

- As maiores concentrações de poluentes no escoamento ocorrem em zonas urbanas com maiores intensidades de tráfego; no entanto, o tipo de sistema de drenagem afecta a qualidade da água.

- O escoamento de autoestrada é geralmente similar ao escoamento urbano e não contém concentrações apreciavelmente superiores em metais pesados ou óleo e gorduras. Consequentemente, o mesmo tipo de controlo de escoamento usado para tratar as águas pluviais urbanas é também apropriado para tratar descargas de autoestradas. Esta afirmação é confirmada pelo quadro (A.11) (pag. 114) onde as massas de poluentes nos sedimentos nas autoestradas não diferem muito das zonas com características urbanas.

2.1.2.1 Sólidos suspensos

Novotny [46] refere que os sedimentos são um componente comum dos escoamentos pluviais, sendo considerados como um poluente. Sedimentos em excesso podem deteriorar a qualidade da vida aquática interferindo com a fotossíntese, respiração, crescimento e reprodução. Também podem transportar outros poluentes que estão ligados a estes, incluindo, nutrientes, metais e hidrocarbonetos (APWA(1981) *in* Novotny [46]). Nos quadros (A.4)(pag. 112) e (A.11)(pag. 114) podemos ver valores típicos de metais pesados associados aos sedimentos.

Da análise do quadro (A.8)(pag. 113) o qual apresenta valores de poluição associados aos sedimentos, verificamos que o seu peso varia entre 65 % a 99 % (percentagens relativas entre poluentes particulados e poluentes totais). Isto significa que grande parte da resposta ao tratamento das águas de escorrência passa por um tratamento de sedimentação. Pela análise do quadro (A.9)(pag. 113), sobre valores de remoção de poluentes associados à sedimentação, verifica-se que este processo permite atingir valores de remoção de 40 % a 90 %, dependendo da natureza do poluente.

Irish [34] refere que os valores de SST⁷ e SSV⁸ estão dependentes das condições de tempo seco anterior, tais como :

- Deposição de poeiras.
- Manutenção e limpeza das ruas.
- Intensidade do escoamento na chuvada anterior.

Os valores de SST e SSV dependem do tempo de estiagem anterior e da intensidade de tráfego [34]. No quadro (A.5)(pag. 112) podemos ver valores indicativos de deposição de sedimentos em zonas urbanas em função do tráfego. Pela análise dos valores podemos ver que a acumulação de sedimentos varia com o volume de tráfego e com a existência ou não de passeios (os passeios aumentam a acumulação de sedimentos ao longo das vias de comunicação).

Segundo Irish [34], foram comparados valores em ruas com limpeza e outras sem limpeza, concluindo-se que foram obtidas reduções de cargas nas águas de escorrência das chuvas com uma probabilidade de 99 % relativo aos SST e uma probabilidade de 95 % relativo aos SSV. Conclui-se assim que é possível o controlo na fonte da poluição difusa relativa aos SS⁹.

Castro [13] refere que a limpeza das ruas representa eficiências variáveis não só em função

⁷SST - Sólidos Suspensos Totais

⁸SSV - Sólidos Suspensos Voláteis

⁹SS - Sólidos Suspensos

da frequência de limpeza, da tecnologia utilizada e do estado de conservação das ruas como também das condições climáticas específicas.

Para o referido autor [13] os climas com fortes variações sazonais, apresentando um longo período seco (caso do clima mediterrânico), são os mais favoráveis. Nestes casos, a limpeza das ruas deve apresentar eficiências de remoção de 30 % a 40 % de sólidos suspensos para frequências de limpeza de três a quatro vezes por semana.

Castro [13] defende também que as lagoas de retenção de águas de escorrência atingem eficiências de 50 % de sólidos suspensos. No apêndice (B) (pag. 115) são apresentadas duas metodologias para o dimensionamento de lagoas de sedimentação para águas de escorrência pluvial em condições hidrodinâmicas, nomeadamente a metodologia de Fair e Geyer (1954) recomendado pela EPA e a de Raju *et al.*(1999).

Para Castro [13] os decantadores atingem eficiências de 20 % a 60 % de sólidos suspensos.

No quadro (A.10)(pag. 113) podemos analisar a variação do tempo de retenção hidráulica para conseguirmos uma remoção de 60 % de sólidos suspensos a 1,2 m de profundidade. Ao analisarmos o quadro concluímos que quanto maior a concentração inicial de sólidos, menor é o tempo de retenção necessário para se atingir a remoção pretendida.

2.1.2.2 Carência de oxigénio

É comum encontrar-se nas águas pluviais substâncias tais como folhas de árvores, excrementos de animais, resíduos sólidos urbanos e matéria orgânica, os quais diminuem o nível de oxigénio nos corpos de água (U.S.EPA(1992) *in* Novotny [46]).

Irish [34] refere que a carência de oxigénio (CBO^{10} e CQO) é dominada pela intensidade de tráfego nos períodos de estiagem.

Segundo Irish [34] a carência de oxigénio depende da intensidade de tráfego só sendo possível reduzir a carga de poluentes com a redução do volume de tráfego. Assim, a forma de mitigar o problema passa pela recolha e tratamento das águas das ruas e auto-estradas.

Castro [13] refere que as lagoas de retenção de águas de escorrência podem atingir eficiências de 25 % a 40 % na remoção do CBO.

De acordo com Castro [13] os tanques de sedimentação podem atingir uma eficiência de 30 % de CBO.

2.1.2.3 Óleos e gorduras

Alguns hidrocarbonetos a baixas concentrações são tóxicos para os organismos aquáticos (Woodward-Clyde (1990) *in* Novotny [46]). A fonte principal dos óleos e gorduras são as fugas dos motores, derrames em estações de serviço, derrames em reservatórios demasiado cheios, desengorduradores de restaurantes e óleos usados (Berman *et al.* (1991) *in* Novotny [46]).

Irish [34] refere que os óleos e gorduras são dominados pela intensidade de tráfego nos

¹⁰CBO - Carência Bioquímica de Oxigénio

períodos húmidos e que a estes parâmetros se aplica o mesmo princípio da carência de oxigénio, ou seja, consegue reduzir caso se reduza o volume de tráfego. Dever-se-á fazer recolha e tratamento das águas de escorrência.

2.1.2.4 Nutrientes

Nutrientes, incluindo o azoto e o fósforo, são encontrados nas escorrências pluviais. Estes nutrientes podem provocar um crescimento excessivo ou acelerado de vegetação ou algas resultando numa deterioração do uso da água para abastecimento público [46].

As cargas de nitratos $[NO_3^-]$ e fósforo total $[P_T]$ são dependentes da intensidade de tráfego durante os períodos de estiagem. A contagem de tráfego é apenas uma variável que melhor traduz as condições de carga no tempo de estiagem; no entanto, estes parâmetros dependem das condições gerais [34].

Segundo Irish [34] a chuva é uma fonte importante em nutrientes no escoamento, Quadro (A.7)(pag. 113).

Para o referido autor [34], a forma de mitigar as cargas de nutrientes passa pelo mesmo tratamento utilizado pela carência de oxigénio e óleos e gorduras, porque o controlo na fonte não tem viabilidade.

Castro [13] refere que os tanques de sedimentação podem atingir uma remoção de 20 % no P_T e 30 % no TKN¹¹.

2.1.2.5 Metais

Os metais pesados mais comuns nas escorrências pluviais são o chumbo $[Pb]$, zinco $[Zn]$, cádmio $[Cd]$ e cobre $[Cu]$. É também frequente encontrar-se crómio $[Cr]$ e níquel $[Ni]$ (U.S.EPA (1991) in Novotny [46]). Os metais pesados são uma preocupação, porque são tóxicos para os organismos aquáticos [46]. Podem ser bioacumuláveis e têm um potencial de contaminação das fontes de abastecimento de água [46].

A carga de cobre $[Cu]$ e chumbo $[Pb]$ é bastante influenciada pela intensidade de tráfego durante a chuvada [34].

As variáveis de controlo do ferro $[Fe]$ são condicionadas pelo tempo de estiagem. Estas não parecem ser significativamente influenciadas pela intensidade de tráfego tanto em tempo seco, como húmido [34].

As cargas de zinco $[Zn]$ são influenciadas pela intensidade de tráfego nos períodos de estiagem e das características da chuvada anterior [34]. Tem-se observado que para este parâmetro, a intensidade de tráfego no tempo de estiagem é mais importante do que propriamente o tempo que decorre entre chuvadas [34].

Os esforços para gerir as cargas de $[Cu]$ e $[Fe]$ devem direccionar-se pelo controlo da escorrência das chuvas, que passa pela recolha e tratamento desta [34].

No caso do ferro $[Fe]$ não foi detectada diferença significativa entre as cargas médias deste metal em períodos de limpeza de ruas e de não limpeza destas [34]. Uma maior

¹¹TKN - Azoto Kjeldahl

frequência de limpeza mostra ser mais efectiva nos constituintes associados aos sólidos em suspensão arrastados pelo escoamento [34].

Segundo Irish [34], a mitigação das cargas de zinco [*Zn*] nas águas de escorrência pluviais é limitada pelas medidas de controlo disponíveis para o cobre [*Cu*] e para o chumbo [*Pb*].

Castro [13] refere que climas com fortes variações sazonais, apresentando um longo período seco (caso do clima Mediterrâneo), são os mais favoráveis. Nestes casos, a limpeza das ruas deve apresentar eficiências de remoção de 80 % de metais pesados para frequências de limpeza de três a quatro vezes por semana.

2.1.2.6 Microbiologia

Bactérias e vírus são contaminantes comuns das escorrências pluviais. Nos sistemas separativos, as fontes principais são os excrementos dos animais e descargas de esgotos domésticos subdimensionados [46]. Esta forma de poluição pode ter impacte significativo em zonas balneares.

2.1.2.7 Sólidos flutuantes

Os sólidos flutuantes podem conter montantes significativos de metais pesados, pesticidas e bactérias. Estes sólidos resultam, em regra, dos resíduos das ruas ou das áreas industriais de depósito de lixo, e são inestéticos nos drenos de água ou nas lagoas de retenção [46].

2.1.2.8 Outras substâncias tóxicas

Podem ser encontradas nas escorrências pluviais em baixas concentrações. Os compostos orgânicos mais usuais nos escoamentos pluviais são : pesticidas, fenóis e polinucleares ou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (Cidade de Seattle (1989) *in* Novotny [46]) .

Fisher *et al.* [29] realizaram um estudo na Baía de Santa Mónica no sentido de verificar a presença de dioxinas, furanos e naftalinas policlorinadas (NPC's) nas escorrências pluviais.

O estudo chegou às seguintes conclusões:

- A existência de dioxinas, furanos e NPC's.
- Detecção destes compostos na água da chuva, tendo-se levantado a hipótese de haver também lavagem do solo.
- A concentração destes compostos é bastante superior durante as tempestades comparativamente com tempo seco, associada a um mais elevado caudal durante estes fenómenos meteorológicos, o que significa que a massa destes poluentes é bastante superior.
- As concentrações de dioxinas, furanos e NPC's estão correlacionados com a ocupação comercial e urbanizada do solo. Esta ocupação suporta as estratégias de controlo de qualidade da água que estão associadas ao uso do solo.

Segundo este autor as possíveis fontes destes compostos são :

- Processos de combustão na presença de carbono orgânico, cloro e metais pesados (Olie *et al.* (1977); Buser *et al.* (1978); Stieglitz *et al.* (1989) *in* Fisher *et al.* [29]).

- Por vezes como sub-produtos de reacções orgânicas, na síntese de compostos clorinados aromáticos (Swansen *et al.* (1978) in Fisher [29]), produção de cloro e branqueamento de pasta (Swansen *et al.* (1978); Amendola *et al.* (1989) in Fisher [29]).
- Óleos de motor usados os quais, podem conter estes compostos (Marklund *et al.* (1990) in Fisher[29]).
- Deposição de aerossóis de combustão.
- Derramamento de óleo do *carter* dos veículos automóveis.
- Descargas ilegais de resíduos nos colectores pluviais.

2.1.3 Origem agrícola

2.1.3.1 Sólidos suspensos

A grande fonte de sólidos suspensos associado à origem agrícola provem do fenómeno de erosão dos solos. Esta pode classificar-se em eólica e hídrica.

Segundo Schultz [62], a erosão eólica é causada pelo vento e ocorre com maior intensidade em solos arenosos em regiões sujeitas a secas periódicas e nas quais o solo está desprotegido de coberto vegetal.

Ainda de acordo com este autor [62], a erosão hídrica é a mais importante porque ocorre em todos os tipos de solo, tratando-se do resultado da energia de desgaste da chuva e do escoamento. Manifesta-se em três formas :

- Erosão superficial ou laminar - corresponde à remoção da camada superior do solo. De acordo com Schultz [62] é o pior tipo de erosão porque apresenta um desgaste uniforme em toda a altura da camada sem apresentar grandes vestígios do seu efeito. Corresponde ao primeiro estágio de erosão.
- Erosão por sulcos - a erosão laminar pode provocar sulcos no terreno. Esta forma de erosão é mais visível.
- Erosão por ravina - caso não se controle a erosão por sulcos estes passarão a ser em maior número, mais profundos e aparecerá a erosão por ravina.

Nas origens agrícolas os sedimentos só por si são uma forma de poluição, mas estes tenderão a transportar outras formas de poluentes com efeitos nefastos no meio ambiente (azoto, fósforo, pesticidas, etc.).

As formas de controlar a erosão passa pela adopção de técnicas de conservação do solo largamente difundidas. Como :

- Pousio - neste tipo de prática, Castro [13] refere que se conseguem reduções na perda de solo de 74 %.
- Rotatividade de culturas.
- Plantação segundo as curvas de nível.
- Plantação de culturas alternadas em faixas ou bandas - Neste tipo de plantação conseguem-se eficiências de 75 % [13].

- Construção de terraços em zonas de relevo acentuado, conseguindo-se assim eficiências de 30 % [13].

A influência das práticas agrícolas adequadas na redução da erosão pode ser avaliada por :

$$R_A = \left(1 - \frac{Cp_1}{Cp_2}\right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Onde,

R_A - redução da erosão, %.

Cp_1 - factor de técnica cultural ponderado (técnica mais favorável).

Cp_2 - factor de técnica cultural ponderado (técnica menos favorável).

A influência da criação de terraços na redução da erosão pode ser determinada por :

$$R_A = \left(1 - \frac{LS_c}{LS_s}\right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

Onde,

R_A - redução da erosão, %.

LS_c - factor fisiográfico com terraços.

LS_s - factor fisiográfico sem terraços.

A abordagem dos factores de técnica cultural e fisiográfico é feita na secção (3.5) (pag. 49) relativa à quantificação da erosão.

2.1.3.2 Carência de oxigénio

O tipo de ocupação do solo tem influência na carência de oxigénio do meio. Se pensarmos na pecuária extensiva, esta é uma grande fonte de poluição para os meios hídricos superficiais. No quadro (A.2)(pag. 111) podemos ver cargas de CBO¹² e CQO associadas à pecuária na bacia hidrográfica do rio Yodo no Japão :

- CBO - Carência Bioquímica de Oxigénio

– Bovinos - 640 $\frac{g}{\text{bovino-dia}}$

– Suínos - 200 $\frac{g}{\text{suino-dia}}$

- CQO - Carência Química de Oxigénio

– Bovinos - 3000 $\frac{g}{\text{bovino-dia}}$

– Suínos - 700 $\frac{g}{\text{suino-dia}}$

Grande parte desta carga de poluentes serão lixiviados pelos escoamentos superficiais.

2.1.3.3 Nutrientes

Num estudo¹³ feito por Steinheimer [65] nos Estados Unidos verificou-se que 70 % dos nitratos $[NO_3^-]$ depositados pela chuva ao longo do ano são feitos na Primavera e no Verão. Este facto deve-se à aplicação de azoto N nos campos nesta época.

Este autor refere ainda que a precipitação contribui com cerca de $7 \frac{kg}{ha}$ (4,2 %) da carga

¹²CBO - Carência Bioquímica de Oxigénio

¹³A área de estudo corresponde a um campo com 40,5 ha, no qual 37,6 ha estão cultivados.

média anual).

Ainda neste estudo, Steinheimer [65] refere que a média anual de carga de azoto é inferior a $3 \frac{kg}{ha}$, o que corresponde a cerca de 2 % da carga anual aplicada.

Os mecanismos através dos quais o nitrato $[NO_3^-]$ é libertado do solo e removido pelo escoamento superficial é complexo. O ião nitrato $[NO_3^-]$ exhibe um comportamento único em relação aos outros nutrientes aplicados sob o solo. É um anião que forma poucos nutrientes insolúveis com outros constituintes do solo. Este comportamento é diferente de outros tipos de fertilizantes, *e.g.*, amónia, azoto Kjeldahl, fósforo inorgânico, carbonato e bicarbonato. No entanto é assumido que o impacto da gota de chuva na superfície produz uma turbulência numa fina camada de solo, libertando o nitrato para o escoamento superficial. Como tal, dispersão e difusão são os dois mecanismos pelos quais o nitrato é libertado.

Linsley [39] refere que 60 % do azoto e 40 % do fósforo que entram nos sistemas de abastecimento de água são atribuídos à lixiviação de zonas agrícolas.

2.1.3.4 Pesticidas

Os pesticidas estão ligados às práticas agrícolas. O seu aparecimento nas águas superficiais é devido à lavagem das superfícies onde foram aplicados ou ainda do transporte de sedimentos com pesticidas adsorvidos. Estes compostos são caracterizados pela sua persistência, capacidade de bioacumulação e toxicidade. No quadro (A.3) (pag. 112) são apresentados valores de meia vida (3 a 20 meses) e desaparecimento a 95 % (1 a 30 anos) relativos a alguns pesticidas que são elucidativos da persistência destes compostos químicos no meio.

2.1.3.5 Microbiologia

Walker *et al.* referem que o *Cryptosporidium* é uma grande ameaça para a saúde humana, superior a outros patogénicos de origem hídrica como a *Giardia*, devido à sua elevada resistência aos tratamentos comuns de água.

Fontes potenciais destes patogénicos são os efluentes e fezes de animais domésticos e selvagens (Buhkari *et al.* (1997) *in* Walker *et al.* [73]). Em particular, *Cryptosporidium* é conhecido por estar presente, em grandes concentrações, no estrume de vaca.

Cryptosporidium e *Giardia* são entero patogénicos de mamíferos. Causam diarreia severa e desidratação [73]. Estes patogénicos são disseminados por esporos denominados de *Cysts* para a *Giardia* e *Oocysts* para o *Cryptosporidium* [73]. Estes *Cysts* e *Oocysts* são resistentes a muitos *stresses* ambientais, permitindo o transporte dos microrganismos para e através dos sistemas de abastecimento. A doença associada com o *Cryptosporidium*, a Criptosporidiose, é geralmente mais severa que a Giardiose, a doença resultante da *Giardia*, mas de sintomas similares [73]. Não põe em perigo de vida a maioria dos indivíduos saudáveis, mas é bastante grave, chegando a ser fatal, para crianças, idosos, doentes com SIDA e outros com um fraco sistema imunológico, como por exemplo aqueles que estão a receber quimioterapia [73].

Investigadores provaram que os efluentes humanos e de vacas leiteiras infectadas são as maiores fontes destes patogénicos nas águas doces superficiais para a produção de água

para consumo humano (Gallaher (1989); Juranek (1995) *in* Walker [73]). A detecção destes patogénicos é morosa e sujeita a grandes erros [73].

O estrume do gado é rico em actividade microbiológica e fornece um meio para os protozoários e bactérias atacarem *Oocyst*, reduzindo o seu número (Jenkins (1996) *in* Walker [73]). A elevada concentração de amónia no estrume resulta num pH elevado. Robertson *et al.* (1992) *in* Walker [73] demonstraram que valores extremos de pH (altos e baixos) têm um efeito adverso significativo na sobrevivência dos *Oocysts*.

Cryptosporidium pode ter origem numa fonte pontual como um armazenamento de estrume ou difuso como zonas de pecuária ou espalhamento de estrume (Kneale *at al.* (1999) *in* Trudgill [69]).

Tal como foi referido anteriormente, o *Cryptosporidium* é um patogénico de grande relevância sanitária de possível contaminação difusa ligada à actividade da pecuária. De acordo com Fayer e Ungar (1986) *in* Trudgill [69] *Oocysts* é geralmente resistente a desinfectantes, e cloragens a níveis elevados, apresentam problemas de sabor. Liyanage *et al.* (1997) *in* Trudgill [69] avaliaram a capacidade de desinfecção de cloro, dióxido de cloro, tiosulfato de sódio, clorito e clorato para desinfectar água contaminada com *Cryptosporidium*, tendo concluído que o dióxido de cloro é o desinfectante que desactiva os *Oocysts*.

A filtração lenta em areia é um tratamento eficaz, mas requer grandes áreas de filtros [69]. Timms *et al.* (1995) *in* Trudgill [69] registaram com este processo remoções de 99,997 % de *Oocysts*. Algiers e King (1997) *in* Trudgill [69] referem que a filtração promove clarificação adequada à água e remove 99,9 % das partículas com diâmetros no campo de 4 μm - 5 μm e 5 μm - 15 μm dimensões da *Cryptosporidium* e da *Giardia*.

2.2 Acção da precipitação

Segundo Valiron [70], a precipitação começa por provocar uma molhagem inicial da superfície, que não se traduz em mais nada do que em infiltração. Nesta fase dá-se o início da dissolução de elementos solúveis depositados no solo, os quais se vêm somar aos transportados pela precipitação.

Quando a quantidade de precipitação ultrapassa a fase de molhagem dá-se o escoamento. O escoamento está associado ao arrastamento e ao transporte de partículas depositadas sobre solo. Estes fenómenos são bastante complexos e são função de [70]:

- Energia cinética das gotas da chuva.
- Velocidade do escoamento.
- Coesão dos depósitos que é mais forte quanto maior for a distância entre duas chuvadas.

O arrastamento pode mesmo transformar-se em erosão nos terrenos naturais [70].

O arrastamento e o transporte são essencialmente função de factores característicos da chuva [70] :

- Altura da chuva caída, sua intensidade e progressão.

- Granulometria da chuva - as gotas maiores têm uma energia cinética maior permitindo desligar os elementos depositados.

Estes parâmetros pluviais intervêm entre si e ligados aos do solo, como a pendente e erodibilidade. A natureza do solo intervem ligada à importância dos poluentes depositados [70].

2.3 Legislação aplicada

O objectivo da directiva quadro relativa à água é a definição de um conjunto de objectivos que garantam uma política sustentável para a água, que são [51, 52, 53, 54, 55] :

- *O abastecimento de água para consumo humano.*
- *O abastecimento de água para outros fins económicos.*
- *A protecção do ambiente.*
- *A atenuação do impacto dos períodos de cheia e de seca.*

Face à dificuldade de compatibilizar sempre estes quatro objectivos, a directiva dá especial relevância à protecção do ambiente.

A proposta de Directiva Quadro para a água [51] refere que :

A expressão "poluição de fonte difusa" abrange uma vasta gama de fenómenos muito diversos, em que a única característica realmente comum é constituírem formas de poluição sem uma fonte pontual. Dado que as autoridades têm vindo a tratar de forma mais eficiente as fontes pontuais, as difusas vão-se tornando, em termos relativos, cada vez mais importantes e necessitam de ser abordadas. No entanto, não se trata de uma única solução simples. A gama de soluções é tão extensa como a dos problemas.

A Proposta de Directiva Quadro refere que as especificações técnicas para a monitorização do estado ecológico das águas devem definir métodos para :

- *Monitorização de todas as massas de água significativas e monitorização representativa de todas as outras massas de águas superficiais*¹⁴.
- *Monitorização das características físico-químicas, biológicas e físicas das massas de água, incluindo os aspectos quantitativos e aspectos dinâmicos como, por exemplo, as variações sazonais e as variações naturais a longo prazo, mas com atribuição do maior grau de importância às características biológicas.*
- *Apresentação dos resultados dessa monitorização de acordo com um formato ou modelo comum, baseado no grau de afastamento do seu potencial ecológico máximo.*
- *Utilização de cinco classificações para a apresentação do estado ecológico das quais as duas superiores serão "excelente estado ecológico"¹⁵ e "bom estado ecológico"¹⁶.*

¹⁴Águas Superficiais - as águas doces superficiais, os estuários e as águas costeiras [51]

¹⁵Excelente Estado Ecológico - o estado ecológico teórico que uma massa de águas superficiais em que se demonstre que não existe influência significativa das actividades humanas [51].

¹⁶Bom Estado Ecológico - o estado ecológico alcançado por uma massa de águas superficiais em que se demonstre a existência de uma influência significativa das actividades humanas, mas que apesar disso apresenta um ecossistema rico, equilibrado e sustentável[51]

Ainda de acordo com esta directiva, as especificações técnicas para a monitorização do estado químico das águas superficiais devem definir métodos para :

- *Monitorização de todas as águas superficiais identificadas como podendo ser afectadas por fontes de poluição pontuais ou difusas das substâncias incluídas na lista do anexo VIII.*
- *Utilização de cinco classificações para a apresentação do estado químico das quais as duas superiores serão "excelente estado químico" e "bom estado químico".*

A proposta da Directiva Quadro [51, 52, 53, 54] refere que, para que haja um bom estado ecológico das águas superficiais, deve haver um controlo da poluição difusa associado ao controlo da poluição pontual, para a seguinte lista de poluentes que corresponde à lista do anexo VIII do ponto anterior :

- *Compostos organohalogenados e substâncias susceptíveis de formar esses compostos no meio.*
- *Compostos organofosforados.*
- *Compostos organoestânicos.*
- *Substâncias e preparações com propriedades comprovadamente carcinogénicas ou mutagénicas ou com propriedades susceptíveis de afectar a reprodução no meio aquático ou através deste.*
- *Hidrocarbonetos persistentes e substâncias tóxicas persistentes e bioacumuláveis.*
- *Cianetos.*
- *Metais e respectivos compostos.*
- *Arsénio e respectivos compostos.*
- *Biocidas e produtos fitofarmacêuticos.*
- *Matérias em suspensão.*
- *Substâncias que contribuem para a eutrofização (em especial, nitratos e fosfatos).*
- *Substâncias com influência desfavorável no equilíbrio do oxigénio (que podem ser medidas através de técnicas como a CQO, a CBO, etc.).*

Ainda de acordo com a Directiva Quadro, os critérios de selecção das substâncias ou grupos de substâncias prioritários com vista à análise dos riscos que representam para o ambiente aquático e da adequação de uma estratégia específica a desenvolver pela Comissão para o controlo das descargas no meio aquático são os seguintes :

A substância ou grupo de substâncias :

- *Está provado que tem efeitos inaceitáveis sobre o ambiente aquático ou há fortes indicações de que comporta riscos para o mesmo.*
- *Encontra-se dispersa numa ou várias partes do meio aquático.*
- *Atinge o meio aquático a partir de diversas fontes e vias de acesso.*

Nesta Directiva, é considerado bom estado das águas superficiais, o estado em que se encontra uma massa de águas superficiais quando os seus estados ecológico e químico são considerados, pelo menos, "bons".

O Decreto-Lei 235/97 [27] relativo à poluição do meio hídrico por nitratos, corresponde à transposição para direito interno da Directiva nº 91/676/CEE. Este decreto-lei prevê como critérios de identificação das águas poluídas por nitratos :

- *As águas poluídas e as águas em risco de serem poluídas por nitratos de origem agrícola devem ser identificadas mediante a aplicação, entre outros, dos seguintes critérios:*
 - *Águas doces superficiais¹⁷ utilizadas ou destinadas à produção de água para consumo humano que contenham ou apresentem risco de vir a conter uma concentração de nitratos superior à definida de acordo com dispostos na Directiva 75/440/CEE, caso não sejam tomadas as medidas em programa de acção adequado.*
 - *Lagoas, outras massas de água doce, estuários e águas costeiras que se revelem eutróficos ou se possam tornar eutróficos a curto prazo, se não forem tomadas as medidas em programa de acção adequado.*
- *Na aplicação destes critérios, deverá ainda atender-se :*
 - *Às características físicas e ambientais das águas e dos solos.*
 - *Aos conhecimentos disponíveis quanto ao comportamento dos compostos de azoto no ambiente (águas e solos).*
 - *À caracterização das actividades humanas nas áreas envolventes.*

O Decreto-Lei 235/97 [27] prevê as seguintes medidas a tomar no programa de acção referido no ponto anterior:

- *As medidas deverão incluir regras relativas :*
 - *Aos períodos em que é proibida a aplicação às terras de determinados tipos de fertilizantes.*
 - *À capacidade dos depósitos de estrume animal; a capacidade destes depósitos deve exceder a necessária para a armazenagem de estrume durante o período mais prolongado em que não é permitida a aplicação de estrume animal às terras situadas em zonas vulneráveis, excepto quando possa ser demonstrado que a quantidade de estrume que exceda a capacidade real de armazenamento será eliminada de modo que não prejudique o ambiente.*
 - *Às doses máximas permissíveis de aplicação de fertilizantes aos solos, compatíveis com a boa prática agrícola e tendo em conta as características da zona vulnerável em questão, em especial :*
 - * *As condições do solo, tipo de solo e declive.*
 - * *As condições climáticas e, nomeadamente, a pluviosidade e a irrigação.*
 - * *A utilização do solo e as práticas agrícolas, incluindo sistemas de rotação de culturas, e deve basear-se no equilíbrio entre :*

¹⁷ Águas Doces Superficiais - todas as águas paradas ou correntes à superfície do solo e acima da linha limite das águas doces. [51]

- *As necessidades previsíveis de azoto às culturas a partir do solo e de fertilizantes correspondente, e*
- *O fornecimento de azoto às culturas a partir do solo e de fertilizantes correspondentes :*

À quantidade de azoto presente no solo no momento em que começa a ser significativamente usado nas culturas (quantidades consideráveis no final do Inverno).

Ao fornecimento de azoto através da mineralização líquida das reservas de azoto orgânico no solo.

Ao azoto proveniente de estrume animal.

Ao azoto proveniente de fertilizantes químicos e outros.

- *As medidas devem assegurar que em cada exploração agrícola ou pecuária a quantidade de estrume animal aplicado anualmente nas terras, incluindo pelos próprios animais, não exceda um montante específico por hectare. A quantidade específica por hectare será a quantidade de estrume que contenha 170 kg de azoto. No entanto:*

- *Para o primeiro programa de acção poderá ser considerada uma quantidade de estrume que contenha até 210 kg de azoto.*
- *Poderão ser fixados outros valores por autoridades competentes. Essas quantidades deverão ser fixadas de modo a não prejudicar o objectivo de reduzir a poluição das águas por nitratos. Esses valores deverão ser justificados com base nos seguintes critérios :*
 - * *Longos períodos de crescimento.*
 - * *Culturas de elevada absorção de azoto.*
 - * *Elevado volume de precipitação na zona vulnerável.*
 - * *Solos com nível excepcionalmente elevado de desnitrificação.*

A constituição de um código de boas práticas agrícolas de acordo com o Decreto-Lei 235/97 é a seguinte :

- *Um Código de Boas Práticas Agrícolas, cujo objectivo seja reduzir a poluição causada por nitratos, deverá incluir disposições que abranjam as seguintes questões, na medida em que forem relevantes:*
 - *Os períodos em que a aplicação de fertilizantes aos solos não é apropriada.*
 - *A aplicação de fertilizantes em terrenos de forte inclinação.*
 - *A aplicação de fertilizantes em terrenos saturados de água, inundados, gelados ou cobertos de neve.*
 - *As condições de aplicação de fertilizantes nas proximidades de cursos de água.*
 - *A capacidade e a construção de depósitos de estrume animal, incluindo medidas que evitem a poluição da água pela drenagem e derramamento para as águas subterrâneas ou superficiais de líquidos que contenham estrume animal e efluentes provenientes de materiais vegetais armazenados, tais como silagem.*

- *Os métodos de aplicação de fertilizantes incluindo a dose e a uniformidade do espalhamento, tanto dos fertilizantes químicos como do estrume animal, de forma a manter as perdas de nutrientes para a água a um nível aceitável.*
- *Poderão ainda ser incluídas as seguintes medidas:*
 - *Gestão de utilização do solo, incluindo sistemas de rotação de culturas e a proporção relativa entre a área consagrada às culturas permanentes e às culturas anuais.*
 - *Manutenção de um nível mínimo de revestimento vegetal do solo durante as épocas (pluviosas) que observará o azoto do solo que, de outra forma, poderia provocar a poluição da água pelos nitratos.*
 - *Elaboração de planos de fertilização para cada uma das explorações e de um registo da utilização de fertilizantes.*
 - *Prevenção da poluição da água provocada pela drenagem ou pela infiltração para além das raízes das plantas nos sistemas de irrigação.*

O Decreto-Lei 2/88 [26] relativo à classificação de albufeiras de águas públicas destinadas ao serviço público para actividades secundárias ¹⁸, proíbe dentro do seu perímetro de protecção (pode variar entre 200 m e 500 m do NPA¹⁹ dependendo do tipo de classificação da albufeira) :

- *O estabelecimento de indústrias que produzam ou usem produtos químicos tóxicos ou com elevados teores de fósforo ou de azoto;*
- *A instalação de explorações pecuárias intensivas, incluindo as avícolas;*
- *O armazenamento de pesticidas e de adubos orgânicos ou químicos;*
- *O emprego de pesticidas, a não ser com autorização especial, que só deverá ser concedida, a título excepcional, em casos justificados e condicionados quanto às zonas a tratar e quanto à natureza, características e doses dos produtos a usar;*

¹⁸Consideram-se como actividades secundárias :

- Pesca;
- Banhos e natação;
- Navegação recreativa a remo e vela;
- Navegação a motor;
- Competições desportivas.

As actividades estão classificadas com um índice :

- 0 - actividades não permitidas;
- 1 - actividades permitidas com restrições;
- 2 - actividades permitidas sem restrições.

As albufeiras podem ser classificadas em :

- Albufeiras de utilização condicionada;
- Albufeiras de utilização limitada;
- Albufeiras de utilização livre.

¹⁹NPA - Nível de Pleno Armazenamento

- *O emprego de adubos químicos azotados ou fosfatados, nos casos que impliquem risco de contaminação de água destinada ao abastecimento de populações ou de eutrofização da albufeira;*
- *O lançamento de excedentes de pesticidas ou de caldas pesticidas e de águas de lavagem com uso de detergentes;*
- *A descarga, ou infiltração no terreno, de esgotos de qualquer natureza, não devidamente tratados, quando seja viável o seu lançamento a jusante da albufeira ou quando excedam determinados valores, a fixar pelos serviços competentes, além de outros parâmetros, dos teores de fósforo, azoto, carbono, mercúrio e outros metais pesados (como o chumbo e o cádmio) e pesticidas.*

A descarga de águas pluviais associadas a colectores unitários está legislada pela regulamentação que define a qualidade da água em termos de poluição pontual como o Decreto-Lei 236/98 [28] e o Decreto-Lei 152/97 [25].

2.4 Controlo da poluição difusa

Castro [13] refere que de uma forma geral, as técnicas de controlo de poluição provavelmente mais eficientes e económicas consistem em práticas de conservação e gestão do solo nas áreas rurais e em controlos arquitecturais nas zonas urbanas e não no tratamento de águas residuais. Castro [13] propõe diversas formas de controlar a poluição difusa :

2.4.1 Controlo indirecto

Conjunto de formas de actuação que indirectamente actuam na minimização da poluição difusa. Incluem-se dentro destas medidas [13] :

- Aplicação de impostos nas perdas de solo e de poluentes (medidas punitivas).
- Implementação de subsídios para a redução das perdas de solo e de poluentes (medidas compensatórias).

2.4.2 Controlo directo

Conjunto de formas de actuação com um efeito directo sobre a redução da poluição difusa.

2.4.2.1 Controlo directo a nível macro

Incluem-se neste tipo de controlo, todas as medidas de planeamento que tenham como preocupação a redução da poluição difusa. Este tipo de controlo é de natureza não estrutural e pode incluir [13] :

- Zonamento para controlo das actividades de uso do solo em áreas críticas.
- Disposições regulamentares para controlo da erosão.
- Disposições regulamentares para a aplicação de fertilizantes, pesticidas e deposição de resíduos animais.
- Disposições regulamentares para a construção de aterros e implementação de operações de drenagem.

2.4.2.2 Controlo directo a nível micro

O controlo a nível micro pode ser dividido em três categorias [13]:

- Controlos não estruturais - conjunto de medidas de actuação no terreno que não impliquem a criação de infraestruturas, *e.g.*, limpeza, práticas do pousio, etc.
- Controlos semi-estruturais - conjunto de medidas que impliquem a realização de alguns trabalhos, *e.g.*, estabilização do solo, revegetação, construção de terraços em zonas de relevo acentuado, prática de culturas ao longo das curvas de nível, etc.
- Controlos estruturais - conjunto de medidas que implicam a criação de infraestruturas, *e.g.*, lagoas de retenção de escorrências, tanques de armazenamento, pavimentação porosa, tanques de sedimentação, etc.

De acordo com Wanielista e Yousef (1993) *in* Novotny [46], estudos realizados na Florida determinaram que os primeiros 25 mm de escoamento geralmente transportam 90 % da poluição de uma chuvada.

O tratamento de pequenas e frequentes chuvadas é a forma adequada de gestão da qualidade da água. O montante a tratar depende da dimensão da bacia hidrográfica, da área impermeável, da utilização do solo, do tipo de sistema de gestão de águas pluviais e o mais importante, o tipo de meio receptor e qualidade da água desejada (Wanielista e Yousef (1993) *in* Novotny [46]).

Novotny refere que as técnicas de gestão de águas pluviais podem-se dividir em [46]:

- **Controlo na fonte (CF)** - redução das taxas de emissão de poluentes na fonte.
- **Modificação hidrológica (MH)** - modificação hidrológica das bacias hidrográficas com o objectivo de diminuir a actividade hidrológica nas áreas de origem e consequentemente a carga de poluentes arrastados.
- **Controlo da emissão (CE)** - atenuação da emissão de poluentes entre as áreas de origem e os corpos receptores.
- **Tratamento (T)** - remoção dos poluentes das escorrências antes de entrar no meio receptor.

2.4.3 Sistemas de controlo na fonte (CF)

Valiron [70] refere que nas zonas urbanas, os locais que apresentam maiores riscos de fonte de poluição são :

- Artérias de forte circulação.
- Ruas com árvores na época da queda da folha.
- Mercados ao ar livre aquando da sua limpeza.
- As áreas industriais onde se situam os depósitos ao ar livre de matérias sensíveis à dissolução ou ao arrastamento.
- Os depósitos de resíduos.
- Áreas de estações de serviço.

Valiron [70] refere as medidas usualmente utilizadas tendo em vista a diminuição da poluição difusa :

- Recolha de folhas. A quantidade pode ser importante, assim como o seu efeito na poluição gerada [70]. É referido que em Neuilly/Seine, o município recolhe anualmente cerca de 1200 toneladas de folhas, o que origina uma média de quatro toneladas por hectare.
- Obrigação dos mercados recolherem os seus detritos e de não os lançarem nos esgotos.
- Reforço da limpeza nas zonas de maior circulação.
- Equipar estas zonas com dispositivos de retenção de detritos, *e.g.*, sumidouros ou caixas de visita com fossas de decantação.

Outras medidas preventivas apontadas pelo mesmo autor [46], são as seguintes :

- **Programas de informação pública.**
- **Controlo na aplicação de fertilizantes.**
- **Controlo na aplicação de pesticidas.**
- **Sistemas de gestão de resíduos sólidos.**
- **Controlo de descargas ilícitas.**
- **Limpeza das ruas** - estudos realizados nos Estados Unidos confirmam que o varrimento das ruas de uma a duas vezes por semana permite a redução de 10 % a 30 % dos poluentes em tempo de chuva [70]. Este estudo conclui que esta política é apenas interessante para os locais onde existem sistemas separativos [70].

Noutro estudo em Toulouse conseguiu-se diminuir as cargas em 50 % combinando-se o varrimento da rua com a lavagem com jacto de água sobre a superfície [70]. Valiron [70] refere que o problema a resolver é a recuperação das águas de lavagem.

- **Controlo da erosão** - utilização de técnicas e práticas que reduzam o transporte de sedimentos.
- **Sumidouro com decantação** - se regularmente limpa é um excelente meio de reter matérias em suspensão [70]. Pode ser utilizada em zonas de águas carregadas de sedimentos.
 - Vantagens [70] - retem areia, gravilha. É facilmente limpa com equipamento apropriado.
 - Inconveniente [70] - a decantação pode reter matérias biodegradáveis, que obriga a uma limpeza mais frequente.
- **Sumidouro com cestos para reter sólidos grosseiros** [70] - apresenta a desvantagem de se obstruir facilmente. Pode ser utilizado em zonas de arrastamento de folhas.

2.4.4 Sistemas de modificação hidrológica (MH)

A utilização dos sistemas a seguir referenciados pode trazer alguns riscos para os lençóis freáticos.

- **Trincheiras drenantes** - estão situadas logo a jusante das zonas impermeabilizadas e recolhem as águas escoadas perpendicularmente ao seu comprimento restituindo-as posteriormente à rede após o armazenamento com um caudal regular e amortizado (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

Estes sistemas são colocados em zonas onde o solo tem uma permeabilidade baixa (*e.g.*, argilas). O armazenamento da água é feito em meio poroso (material granular).

- **Trincheiras de infiltração** - são semelhantes às trincheiras drenantes mas restituem a água em meio não saturado (solos permeáveis com $k > 10^{-4} \frac{m}{s}$) (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).
- **Pavimentos permeáveis** - usualmente este tipo de pavimento é constituído por três camadas de material [70]:
 - Camada superficial (betão betuminoso drenante).
 - Base de material drenante (gravilha betuminosa drenante).
 - Fundação em brita para servir de reservatório da água da chuva (brita).
- **Canais pouco profundos** - consiste em substituir os drenos de água pluvial enterrados por canais pouco profundos situados nos espaços verdes colectivos em terreno permeável. São sistemas semelhantes a lagoas de retenção.
- **Poços de infiltração** - sempre que existem terrenos permeáveis em altura podemos recorrer a poços de infiltração.

2.4.5 Sistemas e controlo de emissão (CE)

- **Descarregadores de tempestade** - têm como função permitir a descarga de efluentes de sistemas unitários em período de tempestade.

2.4.6 Sistemas de tratamento (T)

- **Sistemas de lagunagem** - de acordo com Valiron [70], os sistemas de lagunagem podem dividir-se em :
 - **Lagoas de retenção (T + MH)** - o objectivo principal é o de reduzir o escoamento nos colectores, deixando passar somente o caudal adequado à conduta. É utilizado sem sistemas separativos [70].
 - **Lagoas de armazenamento - Laminagem (T + MH)** - tem como função reduzir o número de descargas ou de estabilizar o escoamento nos sistemas a jusante para melhorar o rendimento do tratamento a jusante [70].
 - **Lagoas de armazenamento - Decantação (T + MH)** - têm por objectivo realizar uma decantação tendo em vista a remoção de poluentes [70]. De acordo com Valiron [70], são designadas usualmente de lagoas de despoluição.

- **Lagoas de infiltração (CE + MH)** - as lagoas de infiltração são utilizadas em sistemas separativos e permitem armazenar a água antes de a restituir de forma controlada por infiltração no solo. São usualmente utilizadas em zonas de estradas e autoestradas (Adler (1993) *in* Thevenot [67]). De acordo com Bourrier [5], os principais pontos de interesse na utilização de sistemas de retenção são :

- * Dimensionamento reduzido dos colectores a jusante devido ao efeito retardador e regulador do caudal.
- * Retenção da poluição através da retenção dos sólidos flutuantes, hidrocarbonetos e sedimentação da matéria em suspensão.
- * Aspectos relativos à restituição da água ao seu meio, a manutenção da vida aquática, pólo de atracção e estética paisagística que se procura numa lagoa num espaço urbano.

Para a determinação da remoção de sedimentos em lagoas em condições hidrodinâmicas podemos utilizar as metodologias apresentadas no apêndice B (pág. 115).

- **Desarenadores** - o objectivo da desarenação é o de reter partículas sedimentáveis afim de proteger as instalações a jusante. Este processo deve ser realizado com velocidades de escoamento entre 0,2 e 0,5 $\frac{m}{s}$ (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

De acordo com este autor [67], a eficiência destes sistemas é muito variável, dependendo da concepção e do funcionamento do sistema. O processo de desarenação pode ter os seguintes efeitos na remoção de poluentes nos escoamentos pluviais [67]:

- Sistemas Unitários :
 - * *SST* - 8 % a 20 %.
 - * *SSV* - 1 % a 15 %.
 - * *SS* a 500 °C - 18 % a 60 %
- Sistemas Separativos :
 - * *SST* - 62 %.
 - * *CBO₅* - 35 %.
 - * *CQO* - 45 %.
 - * *Pb* - 58 %.
 - * *Zn* - 42 %.
 - * *Cd* - 29 %.

Os desarenadores podem ser arejados afim de garantir a separação da parte orgânica das areias e das gorduras contidas no efluente são designados de desarenadores-desengorduradores e são utilizados em estações para caudais acima de 50 $\frac{L}{s}$ (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

- **Desengorduradores** - o objectivo da utilização dos desengorduradores é a remoção de óleos e gorduras e em parte dos sólidos flutuantes (partículas com densidade inferior à da água) afim de proteger o meio natural. Estes compostos podem formar, em zonas calmas, uma camada fina que impede as trocas gasosas entre a água e a atmosfera. Pode ainda servir de órgão protector dos sistemas a jusante (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

Os desengorduradores são usualmente dimensionados para velocidades ascensionais

com cerca de $15 \frac{m}{h}$ (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

As eficiências atingidas por este órgão podem ser estimadas em :

- Óleos e hidrocarbonetos - 30 % a 50 %.
- *SS* - 15 % a 25 %.
- Metais pesados - ± 10 %.

De acordo com estudos realizados por este autor (Adler (1993) *in* Thevenot [67]), conseguem-se melhores eficiências na remoção de hidrocarbonetos em tempo de chuva do que em tempo seco.

- **Gradagem e Tamização** - Adler (1993) *in* Thevenot [67] refere que a gradagem em águas pluviais é realizada com espaçamentos de barras entre 30 mm e 100 mm (pré-gradagem) e entre 10 mm e 25 mm (gradagem). No entanto gradagens inferiores a 10 mm pode por vezes ser realizada, em particular com a ajuda de macrotamisadores rotativos.

A gradagem não tem efeito sobre as partículas inferiores à malha, mas apenas na poluição dita estética [67].

Esta operação é utilizada para a preservação de operações a jusante que exigem protecção, tais como : Estações de bombagem; Válvulas; Sifões; entre outros, [67].

- **Tratamento físico-químico** - os tratamentos físico-químicos, estritos podem ser aplicados às drenagens de chuva e eliminar as matérias coloidais ou emulsionadas, e em segundo lugar reter a matéria em suspensão por precipitação (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

De acordo com este autor, os colóides são partículas de diâmetro compreendido entre $0,1 \mu$ e $0,001 \mu$ com uma superfície específica compreendida entre $6 \cdot 10^6 \frac{m^2}{m^3}$ e $6 \cdot 10^9 \frac{m^2}{m^3}$, o que traduz as reacções de superfície. Os colóides são em geral os elementos que dão turvação e cor aos efluentes (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

Em geral, é admitido que os colóides não são retidos por filtração e o tempo de decantação num metro de água em repouso a $20^\circ C$ está compreendido entre dois e 200 anos (este valor foi estimado pela lei de Stokes em regime laminar), facto que exclui a eliminação por decantação simples (Adler (1993) *in* Thevenot [67]).

Os processos físico-químicos, através das operações de coagulação-floculação parecem ser os mais adequados para controlar estas partículas.

Para Adler [67], o tratamento físico-químico reduz a concentração de matérias em suspensão (elimináveis por decantação ou flotação estática) e afecta um pouco as matérias dissolvidas (elimináveis por tratamentos químicos ou biológicos).

- **Filtro de areia** - os filtros de areia para águas pluviais correspondem a duas câmaras colocadas sob o pavimento. A primeira serve de decantador. Após a primeira estar cheia, esta descarrega na segunda, onde a água será filtrada para o colector. Novotny [46] refere que a área drenante impermeável para a câmara de decantação, deverá ter a capacidade de $50 m^3$ por hectare impermeável drenado e não deve tratar

mais do que o volume drenado de dois hectares. A câmara de decantação e filtração deverá ter a mesma dimensão.

Capítulo 3

Modelação da poluição difusa

Segundo Castro [13], os modelos de simulação podem ser discretos ou contínuos. A modelação baseada na consideração de acontecimentos discretos simula a resposta da bacia a uma chuvada significativa. Os modelos contínuos fornecem séries cronológicas de caudais e cargas poluidoras, permitindo uma análise estatística da sua frequência e intensidade.

Novotny *in* Castro [13] considera que os modelos de simulação integram as seguintes componentes :

- Uma componente que gera a escorrência superficial descrevendo a transformação das águas pluviais num caudal de escorrência. A modelação desta componente utiliza a fórmula racional ou do método do hidrograma unitário, ambos relacionando o caudal com a intensidade de precipitação e características físicas da bacia hidrogáfica.
- Uma estimação da erosão do solo em áreas permeáveis, utilizando a equação universal da perda de solo (modificada ou não).
- Uma componente que permite modelar os poluentes contidos num dado fluxo de escorrência e que geralmente utiliza factores para relacionar a concentração dos poluentes com a dos sedimentos.

3.1 Quantificação dos poluentes

Para Delville [23], existem duas formas de abordar a quantificação da carga de poluentes:

- A observação.
- A modelação.

3.1.1 A observação

Ao longo do acontecimento de uma chuva podemos tentar estimar os fluxos de poluição pela medida desses fluxos e das concentrações no conjunto dos pontos de amostragem. Alguns problemas colocam-se sempre, nomeadamente :

- A exigência de um grande número de medições complexas sem no entanto facilitar a sua validação estatística.
- Os fenómenos não são mais do que superficialmente abordados.
- Os custos são proibitivos.

3.1.1.1 Parâmetros e dados a medir e recolher

Castro [13] refere que o tipo de dados requeridos pelos modelos de poluição difusa são :

- Dimensão da bacia hidrográfica.
- Subdivisão da bacia em unidades homogéneas.
- Declives.
- Áreas impermeáveis directamente ligadas a canais.
- Capacidade máxima de armazenamento superficial.
- Características do solo incluindo textura, permeabilidade, erodibilidade e composição.
- Culturas e coberto vegetal.
- Características dos sistemas de drenagem natural e artificial.
- Temperatura.
- Taxa de reacções químicas.
- Coeficientes de adsorção e desorção.
- Densidade do tráfego rodoviário.
- Concentração de poluentes nos sedimentos.
- Radiação solar.
- Precipitação atmosférica.
- Evaporação e evapotranspiração.
- Deposição atmosférica de poluentes.

Cárdenas [10] considera que a geração de poluentes é um processo complexo que depende de muitas variáveis. Estas variáveis têm a ver com as características físicas, como a utilização e a cobertura do solo. Depende ainda de condições específicas do solo, tal como humidade antecedente e carga inicial de poluentes e também das características do fenómeno meteorológico, tal como a intensidade pluviométrica e duração da chuvada. Esta dependência em multi-eventos dificulta a modelação da qualidade da água, embora a metodologia e ferramentas necessárias para gerar polutogramas tenham sido desenvolvidos. A falta de informação na mobilização e cargas iniciais, exige bastante cautela na interpretação dos resultados previstos em polutogramas baseados em multi-eventos.

Segundo Valiron [70], para avaliar a poluição transportada, podemos dividir os parâmetros em função do seu papel no fenómeno, e em parâmetros relativos às condições meteorológicas e parâmetros relativos aos escoamentos pluviais :

- Os parâmetros a medir, relativos à condições meteorológicas são os que a seguir se indicam :
 - Aqueles que influenciam o escoamento na lavagem do solo, erosão e transporte (*e.g.*: altura total, intensidade, duração e hora de início da chuvada). Estes parâmetros podem ser traduzidos no hietograma.

- Aqueles que influenciam os depósitos no solo e nos colectores assim como os materiais arrastados pelo escoamento (*e.g.*: duração do período de estiagem anterior).
- Parâmetros que influenciam a contribuição da poluição pluvial (*e.g.*: poluição transportada pela chuva antes do contacto com o solo).
- Os parâmetros a medir relativos aos escoamentos pluviais são :
 - O escoamento base, o escoamento durante a chuvada, o volume escoado e a duração deste. Estes parâmetros são importantes para a avaliação da lavagem do solo, erosão e continuação de depósitos devido ao transporte.
 - Medição das concentrações de poluentes no escoamento antes e durante a chuvada e caudal associado.

3.1.2 A modelação

Os modelos de quantificação dos polutogramas são um prolongamento dos modelos hidráulicos utilizados na quantificação dos caudais ao longo do tempo, os hidrogramas.

Delville [23] refere que os principais modelos de simulação da poluição apoiam-se na descrição do encaminhamento da matéria em suspensão e das partículas sólidas, reconhecidas como vectores principais da poluição em tempo de chuva.

Segundo Delville [23] distinguem-se três grandes famílias de modelos :

- Modelos empíricos ou estatísticos.
- Modelos determinísticos ou físicos.
- Modelos conceptuais.

3.1.2.1 Modelos empíricos ou estatísticos

Estes resultam da análise estatística de medidas e observações e suportam-se em campanhas longas e exaustivas. Os dados são tratados e analisados com ferramentas clássicas da estatística.

Uma regressão multivariada permite estimar os valores médios anuais ou pontuais de poluição, ou mesmo extrapolar polutogramas completos.

Estes modelos dificilmente são exportáveis, porque são válidos para campanhas de medidas localizadas.

3.1.2.2 Modelos determinísticos ou físicos

Estes descrevem os mecanismos físicos dos fenómenos ligados ao transporte da poluição. A abordagem geral é portanto determinística e de cálculo e supõe o conhecimento exaustivo e preciso das leis físicas que regem o fenómeno :

- A acumulação dos poluentes na superfície ao longo dos períodos de seca.
- O transporte de poluentes pela chuva e pelo escoamento.
- A erosão.
- A mecânica dos fluídos e o transporte das partículas no escoamento.

3.1.2.3 Modelos conceptuais

Estes conjugam o conjunto dos fenómenos em jogo compartimentando o problema.

As relações estabelecidas não são fundadas na descrição precisa das leis físicas mas em equações específicas simplificadas e sobretudo em parâmetros de variação. Eles permitem definir a natureza da transformação do fluxo que entra no que sai, tudo isto respeitando algumas restrições físicas. A utilização destes modelos sobre um determinado local passa pela calibração dos parâmetros externos do modelo com base num número limitado de observações.

3.1.2.4 Abordagem IMR na modelação da poluição difusa

Quim *et al. in* Trudgill [69] defendem que um modelo de poluição difusa deve corresponder a uma abordagem de Informação Mínima Requerida (IMR¹), a qual corresponde à síntese da informação e processos básicos observados num conjunto de parâmetros e fenómenos fundamentais a incluir no modelo final. No essencial os modelos IMR utilizam o mínimo de informação disponível.

Segundo este autor, o modelo final deve ser constituído por uma série de modelos IMR que correspondam aos diferentes componentes do fenómeno, os quais possam ser testados e validados em separado, tais como :

- Processos de geração de poluente no solo disponível para ser lixiviado.
- Processos de lixiviação a partir do solo.
- Processos de transporte do poluente dentro da bacia.

Quim *et al. in* Trudgill [69] referem que pode parecer ideal a aplicação às grandes bacias hidrográficas de um modelo baseado integralmente na abordagem física. No entanto, os autores duvidam que modelos com esta complexidade possam ser justificados, quando a capacidade de medir mesmo a média do poluente lixiviado é tão baixa.

Este autor refere ainda que a abordagem IMR apoia-se em experiências de campo e em modelos com características físicas na sua construção. Eles não substituem estes modelos, apenas mostram serem estes mais apropriados na modelação de uma bacia hidrográfica.

Os modelos físicos e as experiências de campo correspondem à base de dados de informação sobre os fenómenos. Os modelos de abordagem IMR são construídos para serem operacionais e de fácil utilização.

Quim *et al. in* Trudgill [69] referem que, apesar da complexidade dos fenómenos, a abordagem IMR, pode reflectir a dinâmica dos fenómenos à escala da bacia hidrográfica.

Esta abordagem dá-nos um valor guia da perda de poluente ao longo do tempo e associado a diferentes usos do solo, mas nunca obteremos uma estimativa exacta. A necessidade de ser preciso no resultado não é crítica, porque os dados de origem sofrem também de grande incerteza, nomeadamente :

- A carga total de poluente disponível para ser lixiviado.

¹Do Inglês : MIR - *Minimum Information Required*

- A capacidade de retenção da água pelo solo.
- A área por unidade de classe de solo em toda a bacia hidrográfica. Inclusivé a definição do número de classes necessárias.
- A precisão dos dados metereológicos
- As práticas de cultivo e de ocupação do solo.

A abordagem IMR permite ainda apoiar o planeamento e ordenamento do território com base nos possíveis impactes na poluição difusa das águas superficiais, conhecendo-se à partida as futuras ocupações do solo.

Uma importante observação sobre a modelação de poluentes é feita por Novotny *et al.* [47]. Estes autores referem que mais de 15 anos de desenvolvimento de modelos determinísticos de escoamento urbano e qualidade da água, acompanhados da respectiva calibração e verificação com numerosos dados, revelaram que :

- Modelos hidrológicos determinísticos de escoamento e qualidade são bastante variáveis e usualmente de difícil reprodutividade, mesmo depois de uma alargada calibração do modelo.
- Aumentar a complexidade dos modelos não garante à partida uma melhor representação do processo.
- Os melhores modelos apenas reproduzem tendências gerais dos dados, não abrangendo uma grande componente de variabilidade do fenómeno.

3.2 Modelação do transporte de poluentes

Um hidrograma descreve a evolução de um escoamento ao longo do tempo enquanto que um polutograma descreve a evolução da taxa a que os poluentes se dissolvem ou suspendem no transporte em escoamento.

Wanielista [74] refere que a base de um polutograma é uma reacção de 1^a. ordem, *i.e.*, a quantidade de poluentes transportados é proporcional à quantidade de poluentes que são depositados na bacia hidrográfica.

Uma reacção de 1^a. ordem é descrita por uma expressão do tipo :

$$\frac{dP}{dt} = -k \cdot P \quad (3.1)$$

Se integrarmos em relação à massa inicial de poluentes (P_0), obtemos a seguinte equação.

$$\begin{aligned} \int_{P_0}^P \left(\frac{dP}{P} \right) &= \int_0^t -k \cdot dt \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow [\ln(P)]_{P_0}^P &= -k \cdot [t]_0^t \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln(P) - \ln(P_0) &= -k \cdot t \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) &= -k \cdot t \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{P}{P_0} &= e^{-k \cdot t} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P &= P_0 \cdot e^{-k \cdot t} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Se quisermos expressar em relação à massa de poluentes removidos, obtemos:

$$\begin{aligned} P_0 - P &= P_0 - P_0 e^{-k \cdot t} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_0 - P &= P_0(1 - e^{-k \cdot t}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta P &= P_0(1 - e^{-k \cdot t}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Onde,

P_0 - massa inicial, kg.

P - massa remanescente ao fim do tempo t , kg.

k - taxa de transporte, kg.

ΔP - massa transportada no tempo t .

Para Wanielista [74], a massa de poluentes também pode ser relacionada com o excesso hídrico (R). Se considerarmos a expressão:

$$\frac{dP}{dt} = -c \cdot r \cdot P \quad (3.4)$$

Onde,

P - massa de poluente disponível para ser transportada, kg.

t - tempo desde o início da chuvada, s.

c - coeficiente empírico de arrastamento de poluentes, $\frac{1}{mm}$.

r - taxa de escoamento por unidade de área, $\frac{mm}{s}$.

E integrando a expressão anterior, obtemos:

$$P = P_0 \cdot e^{-c \cdot R} \quad (3.5)$$

Onde,

P - massa de poluente disponível para ser transportada, kg.

R - excesso hídrico acumulado ao longo do tempo ($R = \int r dt$), mm.

Se apresentarmos a equação em relação à massa de poluentes perdida, obtemos a expressão proposta por Wanielista [74].

$$\frac{P}{P_0} = 1 - e^{-c \cdot R} \quad (3.6)$$

Onde,

c - taxa de transporte, $\frac{1}{mm}$.

R - excesso hídrico acumulado no tempo t , mm.

$\frac{P}{P_0}$ - fracção de poluente transportado no tempo t .

Wanielista [74] considera que o volume de chuva efectiva pode ser determinado pelo excesso hídrico (mm) multiplicado pela área da bacia hidrográfica. O caudal escoado pode ser calculado dividindo o volume do excesso hídrico pela variação de tempo (Δt). A massa de carga poluente a cada momento pode ser encontrada pela diferença de massa entre os diferentes tempos. Utilizando estes cálculos, a concentração de poluentes em qualquer altura (Δt) pode ser encontrada.

$$C_t = \frac{P_{t+\Delta t} - P_t}{Q_m \cdot \Delta t} \quad (3.7)$$

Onde,

C_t - concentração de poluente no tempo t .

P_t - massa de poluente transportada no tempo t .

$P_{(t+\Delta t)}$ - massa de poluente transportada no tempo $(t + \Delta t)$.

Q_m - caudal médio no tempo t e $t + \Delta t$.

Δt - variação de tempo.

Wanielista ²defende que este modelo pode ser utilizado em zonas rurais. Em solos arenosos (c) assume valores muito baixos e para solos de natureza argilosa os valores são da ordem de $(0,06 \frac{1}{mm})$.

De acordo com Millar [42], esta metodologia foi mantida nas versões recentes do modelo *SWMM - Storm Water Management Modelo* (Hubber and Dickinson(1988) *in* Millar (1999)) e incluído em diversos modelos de qualidade da água, tais como o *STORM* do *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE(1977) *in* Millar (1999)).

3.2.1 Determinação de c e P_0 em campo.

Millar [42] propõe uma metodologia para determinar *in situ* os valores de (c) e de (P_0).

Por definição, a concentração de poluente no escoamento, $C(\frac{mg}{L})$, é igual à massa de poluente que é exportada da bacia ($-dP$), dividida pelo volume escoado (dV). O sinal negativo de (dP) é devido ao facto de P ter sido definido como a massa residual de poluente na superfície da bacia hidrográfica. Matematicamente podemos expressar da seguinte forma:

$$C = -\frac{dP}{dV} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dP}{dR} \quad (3.8)$$

Onde,

A - área da bacia hidrográfica, km^2 .

dR - o excesso hídrico gerado no intervalo de tempo dt , mm.

dV - volume escoado, m^3 .

C - concentração média do poluente, $\frac{mg}{L}$

Derivando a equação (3.5) e substituindo em (3.8), obtemos:

$$C = C_0 e^{-c \cdot R} \quad (3.9)$$

De acordo com Millar ([42]), o valor dos termos (c) e (P_0) pode ser obtido pela seguinte expressão :

$$C_0 = \frac{c \cdot P_0}{A} \quad (3.10)$$

Millar [42] refere que o tempo que o poluente leva a ser transportado é reflectido no parâmetro (c). Maiores tempos de transporte refletem-se em menores valores de (c).

De acordo com Millar [42], inicialmente era atribuído ao valor de (c) $0,18 \frac{1}{mm}$, o que corresponde ao transporte de 90 % dos poluentes quando o excesso hídrico atinge 12,8 mm (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*(1971) *in* Millar [42]). Mais tarde, foi demonstrado que o valor de (c) varia com :

- A intensidade pluviométrica e a área da bacia hidrográfica (Sonnen (1980) *in* Millar [42]).
- O tipo de poluente (Alley (1981) *in* Millar [42]).
- A inclinação da bacia hidrográfica (Nakamura (1984) *in* Millar [42]).

²Informação obtida junto do autor por via *email*.

3.2.1.1 Exemplos de aplicação

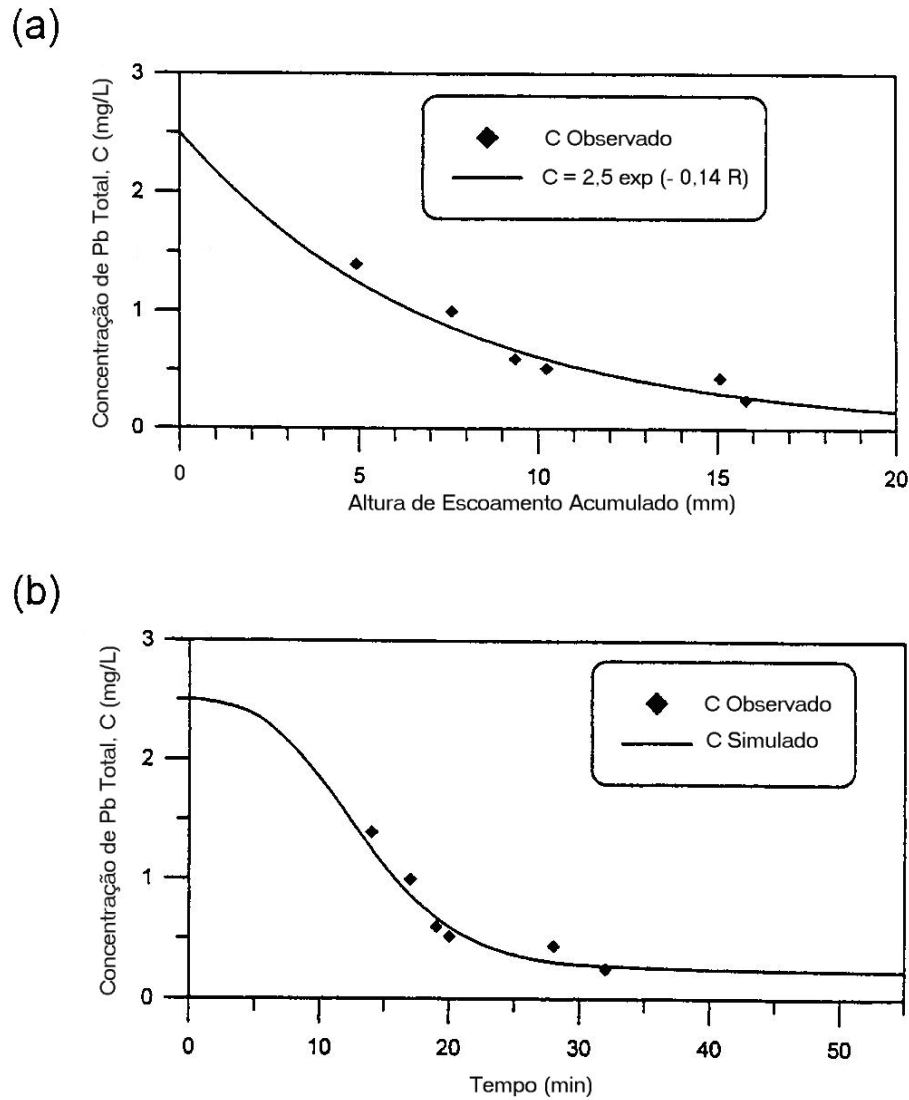


Figura 3.1: Dados relativos ao transporte de chumbo numa chuvada, a partir de seis amostragens no escoamento superficial. Bacia hidrográfica ($A = 0,026 \text{ km}^2$) de ocupação residencial no condado de Dade, Florida. Adaptado de Hardee *et al.*(1979) *in* Millar [42].

Num estudo, Hardee *et al.*(1979) *in* Millar [42], no condado de Dade, Florida, numa bacia de ocupação residencial ($A = 0,026 \text{ km}^2$) para uma chuvada em 3 de Março de 1978, para uma análise de seis amostras ($n = 6$) conseguiu-se uma correlação de ($r^2 = 0,8934$) para o chumbo [P_b], com a seguinte expressão:

$$C = 2,5 \cdot e^{-0,14 \cdot R} \quad (3.11)$$

Comparando com (3.9).

- $c = 0,14 \frac{1}{\text{mm}}$
- $C_0 = 2,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$

A partir da equação (3.10) obtemos $P_0 = 0,46 \text{ kg}$. Na figura (3.1) podemos ver a representação gráfica desta amostragem.

Haster e James (1994) *in* Millar [42], na bacia hidrográfica de Harte Lane ($A = 0,59$

km^2), Houston, Texas, numa chuvada ocorrida em 30 de Abril de 1986. Para uma análise de quatro amostras ($n = 4$) conseguiu-se uma correlação de ($r^2 = 0,9979$) para os sedimentos, com a seguinte expressão:

$$C = 515 \cdot e^{-0,21 \cdot R} \quad (3.12)$$

Comparando com (3.9).

- $c = 0,21 \frac{1}{mm}$
- $C_0 = 515 \frac{mg}{L}$

A partir da equação (3.10) obtemos $P_0 = 1147$ kg.

Barret [2] na *West 35th Street* ($A = 0,00534 km^2$), Austin, Texas. Corresponde a uma zona de autoestrada, junto a uma zona residencial e comercial, 100 % asfaltada, com um coeficiente de escoamento de 0,83. Chegou-se à seguinte expressão para os sólidos suspensos totais (SST):

$$C = 372 \cdot e^{-0,34 \cdot R} \quad (3.13)$$

Comparando com (3.9).

- $c = 0,34 \frac{1}{mm}$
- $C_0 = 372 \frac{mg}{L}$

A partir da equação (3.10) obtemos $P_0 = 5,84$ kg.

3.2.2 Determinação da carga inicial de poluentes em áreas permeáveis

A metodologia proposta por Millar [42] para a determinação de superfícies com características impermeáveis é aplicável a uma camada muito fina de poluente que vai ser arrastada pela chuva efectiva. Se utilizarmos esta metodologia em zonas permeáveis, verificamos que P_0 associado à massa de poluentes arrastados é muito inferior à realmente existente no solo. A razão deste fenómeno é que o poluente existe ao longo de uma camada com uma determinada espessura e a disponibilidade do poluente a ser arrastado ao longo desta pelo escoamento superficial é variável.

Pretende-se apresentar uma metodologia que permita determinar a carga de poluentes disponível para ser arrastada, *i.e.*, a partir de uma concentração conhecida de poluente existente no solo (X_0) fixar o valor da carga de poluente disponível para ser arrastada (P_0).

Para a determinação da concentração de um poluente no solo³, o qual sabemos a relação de peso de poluente por peso de solo⁴,

$$X_0 = \frac{f_X \cdot \rho_{solo} \cdot f_{TF}}{1000} \quad (3.14)$$

Onde,

X_0 - concentração de poluente existente na camada de solo, $\frac{g}{m^3}$.

f_X - fracção de poluente relativamente ao solo.

ρ_{solo} - massa de volúmica do solo, $\frac{kg}{m^3}$.

³Valores que podem ser determinados directamente em laboratório pela análise directa ao solo.

⁴Partículas com diâmetro inferior a 2 mm.

f_{TF} - fracção de terra fina ($< 2mm$).

Considerando uma altura de solo saturado, a variação da migração ao longo do tempo de um poluente à cota z para a superfície é dada por :

$$\frac{dX}{dt} = -y \cdot X \quad (3.15)$$

Onde,

X - concentração de poluente disponível para ser arrastado, $\frac{g}{m^3}$.

y - factor de lavagem do poluente para a superfície, $\frac{1}{s}$.

A contribuição da camada (z) na superfície é dada pela integração em ordem ao tempo (t).

$$\begin{aligned} \int_{X_0}^X \frac{dX}{X} &= \int_0^t -y \cdot dt \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln \frac{X}{X_0} &= -y \cdot t \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow X &= X_0 \cdot e^{-y \cdot t} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Onde,

X - massa de poluente disponível para ser arrastada na cota (z), $\frac{g}{m^3}$.

y - factor de migração do poluente para a superfície, $\frac{1}{s}$.

X_0 - concentração de poluente no solo, $\frac{g}{m^3}$.

Se considerarmos que (t) corresponde ao tempo que o poluente leva a migrar da camada (z) para a superfície ($z = 0.0$), então.

$$t = \frac{z}{v} \quad (3.17)$$

Onde,

z - cota da camada (z), m .

v - velocidade de ascensão do poluente, $\frac{m}{s}$.

t - tempo, s .

Substituindo,

$$X = X_0 \cdot e^{-y \cdot \frac{z}{v}} \quad (3.18)$$

Watson [75] refere que o coeficiente de retardamento mede a capacidade combinada de absorção e adsorção do solo. Geralmente, os metais pesados têm um elevado potencial de retardamento. Os catiões são moderadamente retardados, os aniões são os mais móveis constituintes do lixiviado e têm baixos factores de retardamento.

Acerca deste fenómeno, Gros [31] designa de poder absorvente ou adsorvente a propriedade que o complexo argiloso-húmico tem em reter na sua superfície certos iões em solução no solo. Somente os catiões são atraídos pelo complexo argiloso-húmico, que tem carga negativa.

Numa primeira análise, os seguintes valores podem ser utilizados [75] :

- Metais pesados : $R_t = 50$
- Catiões : $R_t = 5$

- Aniões : $R_t = 1$

Delleur [22] indica que os coeficientes de retardamento podem assumir valores de 1 a 10 000.

O factor de retardamento (R_t) dos poluentes no solo é formulado da seguinte forma [4, 40].

$$R_t = 1 + K_d \cdot \frac{(1 - n) \cdot \rho_s}{n} = 1 + K_d \cdot \frac{\rho_{solo}}{n} \quad (3.19)$$

Onde,

R_t - coeficiente de retardamento.

K_d - coeficiente de distribuição ou adsorção, $\frac{mL}{g}$.

ρ_s - densidade das partículas de solo, $\approx 2,65$.

ρ_{solo} - densidade do solo.

n - porosidade do solo.

O coeficiente de distribuição ou adsorção corresponde à seguinte relação [40] :

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \quad (3.20)$$

Onde,

K_d - coeficiente de distribuição ou adsorção, $\frac{mL}{g}$.

C_s - concentração absorvida e/ou adsorvida na superfície do solo, $\frac{\mu g}{g_{solo}}$.

C_w - concentração na água, $\frac{\mu g}{mL}$.

Citando Liu [40], a velocidade de migração de um poluente no solo é dado por :

$$V_{Rn} = \frac{V_{R1}}{R_t} \quad (3.21)$$

Onde,

V_{R1} - velocidade de migração do poluente de $R_t = 1$, $\frac{m}{s}$.

V_{Rn} - velocidade de migração do poluente de $R_t = n$, $\frac{m}{s}$.

R_t - coeficiente de retardamento.

Podemos considerar esta propriedade do poluente na expressão fazendo a seguinte substituição.

$$X = X_0 \cdot e^{-y \cdot \frac{z \cdot R_t}{v_{R1}}} \quad (3.22)$$

Fazendo uma substituição de variável :

$$k = \frac{y}{v_{R1}} \quad (3.23)$$

Onde,

k - factor de migração do poluente para a superfície, $\frac{1}{m}$.

Substituindo :

$$X = X_0 \cdot e^{-k \cdot z \cdot R_t} \quad (3.24)$$

A massa de poluente, disponível para ser transportada pelo escoamento superficial, consistirá na integração em ordem à altura da camada de solo saturada (h_s), da concentração

de poluente que cada cota contribui para a lixiviação superficial.

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \int_{z=0}^{h_s} X \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow P_0 = \int_{z=0}^{h_s} X_0 \cdot e^{-k \cdot z \cdot R_t} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow P_0 = \frac{X_0}{k \cdot R_t} - \frac{X_0 \cdot e^{-k \cdot h_s \cdot R_t}}{k \cdot R_t} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow P_0 = \frac{X_0}{k \cdot R_t} \cdot (1 - e^{-k \cdot h_s \cdot R_t})
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

A camada de solo saturada (frente de saturação) pode ser obtida pela seguinte expressão [4] :

$$h_s = \frac{I}{\Delta\theta} \tag{3.26}$$

Onde,

h_s - altura da zona saturada do solo, m .

I - infiltração total, m .

$\Delta\theta$ - variação do teor de água no solo.

O grau de humidade do solo é dado por :

$$\theta = \frac{V_w}{V} \tag{3.27}$$

Onde,

V_w - volume de água no solo, m^3 .

V - volume total, m^3 .

A porosidade do solo é dada por :

$$n = \frac{V_v}{V} \tag{3.28}$$

Onde,

V_v - volume de vazios no solo, m^3 .

V - volume total, m^3 .

Quando o solo está saturado o teor em água é igual à porosidade ($\theta_s = n$), então :

$$\Delta\theta = n - \theta_0 \tag{3.29}$$

Onde,

$\Delta\theta$ - variação do teor em água no solo.

n - porosidade do solo.

θ_0 - grau de humidade do solo antes da ocorrência da chuva, m .

O valor relativo à infiltração total é obtido pela diferença entre a precipitação e o escoamento superficial. A metodologia para a determinação destas parcelas é discutida no capítulo (4) (pag. 57).

$$I = P - R \tag{3.30}$$

Onde,

I - infiltração, m .

P - precipitação, m .

R - escoamento superficial, m .

A expressão final será a seguinte :

$$P_0 = \frac{X_0}{k \cdot R_t} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot R_t \cdot \frac{P-R}{n-\theta_0}}\right) \quad (3.31)$$

Onde,

P_0 - massa de poluente disponível para ser lixiviada pelo escoamento superficial, $\frac{g}{m^2}$.

X_0 - concentração do poluente no solo, $\frac{g}{m^3}$.

k - factor de migração do poluente para a superfície, $\frac{1}{m}$.

R_t - coeficiente de retardamento.

n - porosidade.

P - precipitação total, m .

R - escoamento superficial total, m .

A expressão geral proposta para a determinação de substâncias dissolvidas em zonas permeáveis é apresentada da seguinte forma :

$$P_{Solúvel} = \frac{X_0}{k \cdot R_t} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot R_t \cdot \frac{P-R}{1000 \cdot (n-\theta_0)}}\right) \cdot (1 - e^{-c \cdot R}) \quad (3.32)$$

Onde,

P_0 - massa de poluente disponível para ser lixiviada pelo escoamento superficial, $\frac{g}{m^2}$.

X_0 - concentração do poluente no solo, $\frac{g}{m^3}$.

k - factor de migração do poluente para a superfície, $\frac{1}{m}$.

R_t - coeficiente de retardamento.

n - porosidade.

P - precipitação, mm .

c - coeficiente de arrastamento do poluente pelo escoamento superficial, $\frac{1}{mm}$.

R - escoamento superficial, mm .

Na figura (3.2) (pag. 41) podemos ver o comportamento do poluente no solo de acordo com o modelo proposto para a determinação do poluente lixiviado pelo escoamento superficial. A título de exemplo, se considerarmos que o horizonte (A) tem uma altura média de 0,20 m e que apenas 0,5 % de um poluente com um coeficiente de retardamento de ($R_t = 1$), a essa cota chegaria à superfície, obter-se-ia assim um ($k = 26,5 \frac{1}{m}$)⁵. Posteriormente substituindo R_t por valores de 1 a 5, traçar-se-ia o referido gráfico.

De acordo com Novotny *et al.* [46], os poluentes solúveis dependem da capacidade armazenamento, infiltração e escoamento superficial. O modelo proposto toma em consideração estes três factores. Ainda de acordo com estes autores alguns modelos associam os poluentes dissolvidos à intensidade pluviométrica e ao escoamento superficial, onde é considerado que uma fina camada de solo é sujeita a uma mistura completa. De acordo com alguns autores essa profundidade pode ser de apenas alguns milímetros (2 mm a 6 mm, Ahuja *et al.* (1982) in Novotny *et al.* [47]) a poucos centímetros (no modelo CREAMS-GLEAMS a altura considerada para a zona de mistura é de 1 cm).

Na figura (3.2) (pag. 41) podemos ver que a profundidade a que um poluente é lixiviado para a superfície, diminui com o aumento da afinidade deste com o solo. Na figura (3.3) (pag. 42) está representada a evolução da disponibilidade de poluente em função da

⁵Valor obtida a partir da equação 3.24

frente de saturação (h_s) de acordo com o modelo proposto.

A migração de poluente para a superfície é favorecida pelos fenómenos de difusão e dispersão na água intersticial do solo e em contrapartida é dificultada pela infiltração que arrasta os poluentes para o subsolo. De acordo com Parr [48], quanto maior a taxa de infiltração no solo, menor será a massa de poluente libertada no escoamento superficial. É de esperar que o valor de (k) aumente quanto maior for a taxa de infiltração saturada do solo.

Na expressão proposta, estão consideradas variáveis físicas de fácil determinação e/ou estimação (*e.g.*: θ_0 , R_t , n , P , R , X_0). Os fenómenos de mais difícil determinação (*e.g.*: efeito da difusão, dispersão e infiltração na migração do poluente para a superfície) estão representados na constante (k).

O valor de (k) pode ser determinado a partir de medições de campo de acordo com a metodologia proposta por Millar [42]. Determinando P_0 e medindo a concentração do poluente no solo X_0 , é possível determinar k .

Com esta metodologia podemos estimar por métodos indirectos (conhecendo-se a concentração da substância em estudo no solo) o poluente que será lixiviado. Para tal, é necessário um trabalho de campo prévio, para a determinação de (k) e (c) para um determinado poluente e relacioná-los com os diferentes tipos de solo (A, B, C e D) e com as condições prévias de humidade (AMCI, AMCII e AMCIII). Conhecendo estas relações, podemos facilmente extrapolar os resultados obtidos para outras bacias hidrográficas.

A metodologia proposta servirá para determinar a componente solúvel do escoamento. Esta é mais significativa quanto menor for a afinidade do poluente com o sedimento (coeficiente de retardamento baixo). Para um poluente que tenha um coeficiente de retardamento elevado, a carga de poluente está em grande medida associada aos sedimentos transportados pelo escoamento.

O processo de erosão é selectivo, *i.e.*, o escoamento superficial tenderá a transportar as partículas mais finas e a depositar as partículas de maior dimensão. Os poluentes têm tendência de fixar-se mais facilmente às partículas finas (estas têm maior superfície específica⁶), o que implica o enriquecimento dos poluentes no escoamento, por unidade de massa de sólidos.

$$C_E = \frac{f_{XR}}{f_{X0}} \quad (3.33)$$

Onde,

C_E - coeficiente de enriquecimento.

f_{XR} - concentração do poluente no escoamento, $\frac{g_{poluente}}{g_{sedimentos}}$.

f_{X0} - concentração do poluente no solo, $\frac{g_{poluente}}{g_{sedimentos}}$.

⁶Foster *et al.* in WEPP [76] referem que os valores de superfície específica das partículas constituintes do solo utilizados no modelo CREAMS (Chemichals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) da USDA, são os seguintes :

- Areia - $0,05 \frac{m^2}{g}$
- Silte - $4,0 \frac{m^2}{g}$
- Argila - $20,0 \frac{m^2}{g}$
- Matéria orgânica - $1000,0 \frac{m^2}{g}$

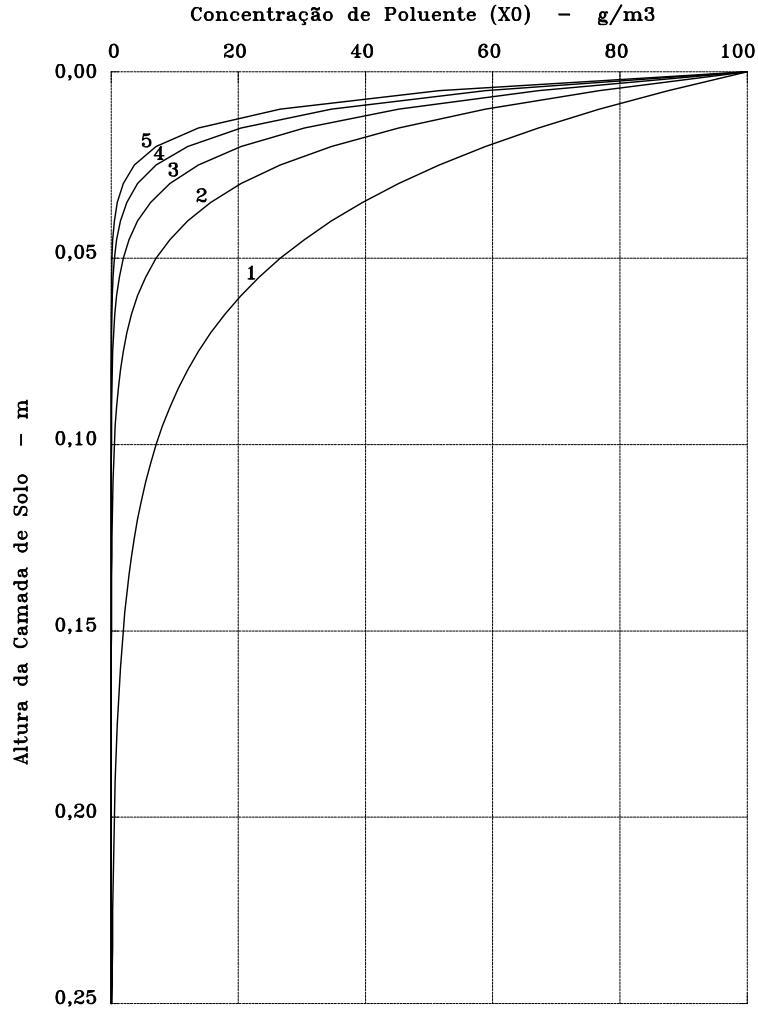


Figura 3.2: Migração do poluente para a superfície em função do coeficiente de retardamento (R_t).

A massa de poluente transportada nos sedimentos será dada pela seguinte expressão :

$$P_{Particulado} = A \cdot C_{ps} \cdot f_{X0} \cdot C_E \quad (3.34)$$

Onde,

C_E - coeficiente de enriquecimento.

A - sedimentos erodidos, kg.

f_{X0} - fracção de poluente no solo, $\frac{g_{poluente}}{g_{sedimentos}}$.

C_{ps} - coeficiente de produção de sedimentos.

A massa total de poluente é dada por :

$$P_{Total} = P_{Solúvel} + P_{Particulado} \quad (3.35)$$

O coeficiente de enriquecimento (C_E) pode ter valores de 1 a 10, dependendo da composição dos sedimentos arrastados, processos de atenuação e afinidade do poluente com

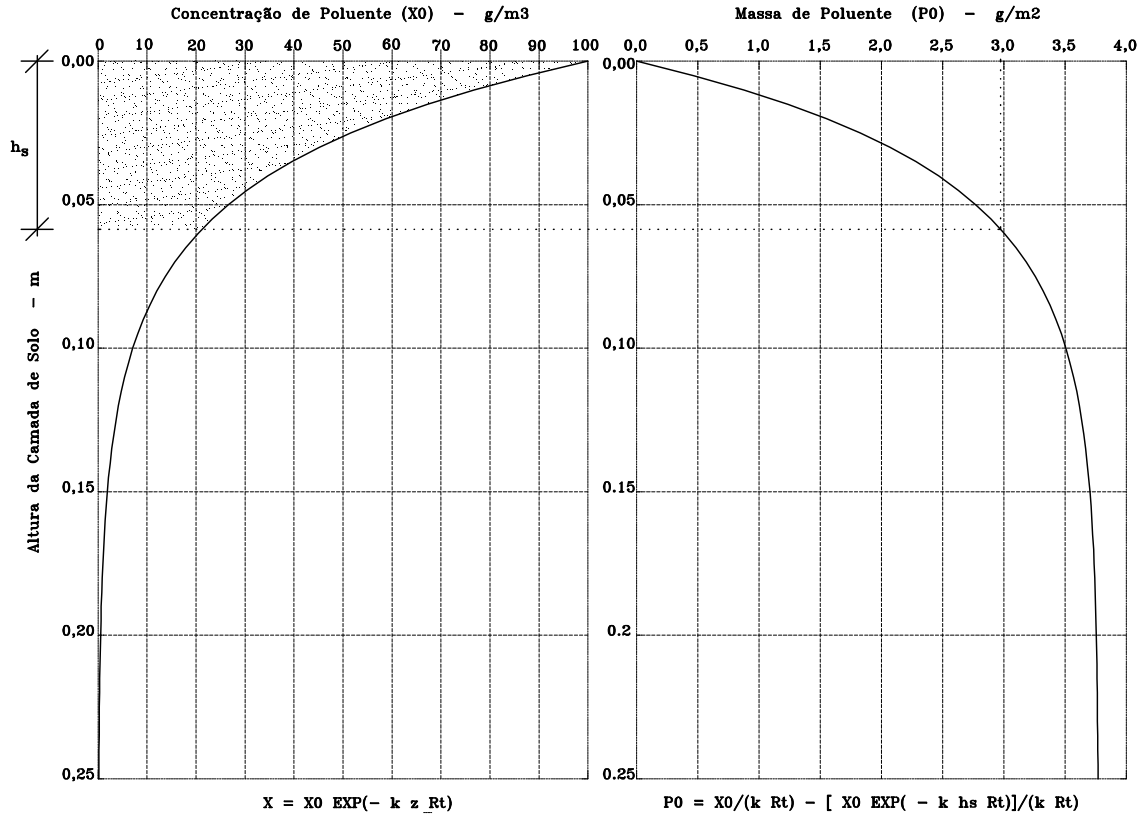


Figura 3.3: Modelo de quantificação da massa inicial de poluente disponível para ser lixiviada pelo escoamento superficial.

as partículas finas [46]. Para poluentes com tendência para solubilizarem-se facilmente (*e.g.*: Nitratos), *i.e.*, a contribuição do poluente adsorvido nos sedimentos é desprezável ($C_E = 0$).

Foster *et al. in* WEPP [76] referem que o coeficiente de enriquecimento dos sedimentos variam usualmente entre 1 e 3, mas que pode atingir valores de 0 a 8. Alguns solos ricos em silte têm valores inferiores a 1 devido à deposição de agregados que contêm grandes quantidades de argila e matéria orgânica.

3.2.2.1 Coeficiente de enriquecimento de sedimentos (C_E)

Para estimar C_E é necessário estimar a superfície específica do solo (SS_m) e o coeficiente de argila (CR_m) (Free, Onstand e Holtan (1975) *in* Novotny [47]) :

$$SS_m = \frac{200 \cdot (\%argila)_m + 40 \cdot (\%silte)_m + 0,5 \cdot (\%areia)_m}{100} \quad (3.36)$$

$$CR_m = \frac{(\%argila)_m}{(\%silte)_m + (\%areia)_m} \quad (3.37)$$

A superfície específica dos sedimentos (SS_e) e coeficiente de argila (CR_e) transportados podem ser obtidos pelas seguintes expressões :

$$SS_e = 14,6 + 0,84 \cdot SS_m \quad (3.38)$$

$$CR_e = 0,021 + 1,08 \cdot CR_m \quad (3.39)$$

Resolvendo as seguintes equações :

$$SS_e = \frac{200 \cdot (\%argila)_e + 40 \cdot (\%silte)_e + 0,5 \cdot (\%areia)_e}{100} \quad (3.40)$$

$$CR_e = \frac{(\%argila)_e}{(\%silte)_e + (\%areia)_e} \quad (3.41)$$

$$100 = (\%argila)_e + (\%silte)_e + (\%areia)_e \quad (3.42)$$

O coeficiente de enriquecimento dos sedimentos é dado por :

$$C_E = \frac{(\%argila)_e}{(\%argila)_m} \quad (3.43)$$

3.2.2.2 Coeficiente de enriquecimento de matéria orgânica (C_{Emo})

Young e Onstad (1976) *in* Novotny *et al.* [47] propõem uma expressão que traduz o coeficiente de enriquecimento da matéria orgânica, com base nos solos de Indiana e Minnesota nos Estados Unidos.

$$C_{Emo} = \frac{0,3}{(\%)MO} + 1,08 \quad (3.44)$$

3.3 Modelo exponencial versus modelo físico

Neste ponto, vamos comparar o comportamento do modelo exponencial (conceptual) e o de um modelo físico. No apêndice (E) (pag. 127) é feita referência a um modelo físico desenvolvido por Parr [48], o qual quantifica a massa de poluentes que se transfere do solo para a coluna de água (escoamento superficial).

Este modelo considera as seguintes variáveis físicas :

- Coeficiente de dispersão do escoamento.
- Coeficiente de difusão moléculas do poluente.
- Coeficiente de retardamento da transferência do poluente para a água.
- Coeficiente de arrastamento do poluente pelo escoamento superficial.
- Propriedades do escoamento, tais como :
 - Altura do escoamento.
 - Velocidade do escoamento.
- Propriedades do solo, tais como :
 - Permeabilidade específica do solo.
 - Taxa de infiltração no solo.
 - Velocidade da água nos poros em função do grau de humidade do solo. Em caso de saturação deste, o grau de humidade é igual à porosidade do solo.
 - Massa volúmica do solo.

O primeiro modelo a ser considerado neste trabalho para a quantificação dos poluentes a serem arrastados foi o proposto por Parr [48]. Após o seu desenvolvimento (em Fortran 90) este foi abandonado, por apresentar alguns dificuldades de aplicação prática, tais como :

- O modelo é válido para quando o solo está saturado, o que significa que é necessário definir o ponto a partir do qual este se encontra nessas condições (só deve ser considerada a libertação de poluentes algum tempo após o início da precipitação). Houve dificuldade na integração com o modelo de geração de chuva efectiva, *i.e.*, a definição do momento em que se verifica a saturação do solo. Esta definição é também dificultada pela variação da humidade inicial do solo (AMCI, AMCII e AMCIII). Uma má definição desse momento pode ocasionar concentrações no escoamento superiores ao existente inicialmente no solo para ser arrastado (C_0).
- Definição de uma concentração inicial de poluente solúvel nos poros do solo para quando este está em estado saturado. Esta definição apresenta alguma dificuldade, porque, se a definição do valor da carga de poluentes disponível para ser arrastada, face à utilização deste apresenta alguma dificuldade e possibilidade de erro. A definição da concentração desse poluente no momento da saturação do solo é ainda de maior dificuldade prática.
- Grande consumo de tempo na definição de todas as variáveis do problema em cada célula. O grande número de variáveis de entrada foi considerado um obstáculo de aplicação prática deste modelo.
- Maior dificuldade de calibração local, comparativamente com o modelo exponencial.
- Grande consumidor de tempo de cálculo comparativamente ao modelo exponencial. Enquanto que para o modelo exponencial apenas é necessário desenvolver o balanço de massas em cada nó, para a determinação do escoamento ao longo do fenómeno hidrológico foi desenvolvido um modelo de escoamento distribuído por diferenças finitas (modelo de onda cinemática) com base num esquema proposto Chow [15].
- Dificil definição dos valores em zonas onde o solo apresente alguma heterogeneidade como é o caso dos espaços de características urbanas. Além disso, não considera o efeito provocado pela cobertura do solo em termos de vegetação, apenas entrando em consideração com as propriedades do solo. A aplicação a áreas impermeáveis também não se afigura viável.
- Apenas permite determinar a perda de poluentes dissolvidos, não contempla a contribuição do poluente nas partículas de sedimento arrastadas no escoamento. É válido para substâncias com pouca afinidade para com as partículas de solo. Substâncias com a propriedade de se ligarem facilmente, a maior percentagem dos poluentes são arrastados com os sedimentos.
- Quando foi testada a sua integração no modelo hidrológico apresentou alguma instabilidade em termos de resultados com a variação de valores do problema ao longo do tempo (velocidade, altura de escoamento, infiltração, entre outros.).
- A aplicação de uma ferramenta de simulação como o método de Monte Carlo ao modelo de poluição difusa, torna-se grande consumidora de tempo de cálculo, porque a cada conjunto de variáveis aleatórias geradas é necessário correr o modelo hidrológico e o de libertação de poluentes.

Em suma, existe alguma dificuldade na aplicação prática (aplicação a uma bacia hidrográfica), na definição das condições de fronteira do problema e na calibração deste modelo; facto pelo qual este foi abandonado.

Após a análise do modelo, concluiu-se que para a sua aplicação, o grau de definição e precisão da informação associado às variáveis, necessário para fazer correr o modelo não é compatível com o grau de informação disponível em campo, o que torna a aplicação de um modelo físico pouco prática. O erro que se obtém no final não compensa o tempo gasto na sua quantificação, porque um modelo não consegue devolver informação com precisão superior àquela que é contida nos dados. A utilização de um modelo conceptual apresenta vantagens sobre este.

A apresentação deste modelo tem por objectivo comparar o seu comportamento com o do modelo exponencial. O modelo de Parr [48] foi testado para condições de escoamento uniforme, *i.e.*, a velocidade e altura de escoamento é constante ao longo do tempo. Foi dada como condição inicial o solo saturado.

A execução desta operação pode ser realizada com qualquer *package* de matemática ⁷ existente no mercado. O problema seria resolvido para uma situação de escoamento uniforme, para uma qualquer condição inicial de concentração de poluente, porque o importante para a calibração do modelo exponencial é o andamento da curva de transferência do poluente em estudo, e esta é independente da concentração inicial do poluente.

3.3.1 Exemplo de aplicação

Vamos simular um problema em escoamento uniforme de acordo com a formulação proposta por Parr [48] (apêndice E, pag. 127), para as seguintes condições :

- Grau de humidade do solo (θ) : $0,3 \frac{m^3}{m^3}$.
- Velocidade de infiltração (I) : $30 \frac{mm}{h}$.
- Permeabilidade específica (k) : $9,3 \cdot 10^{-10} m^2$.
- Coeficiente de Manning (n) : $0,025 \frac{s}{m^{-\frac{1}{3}}}$.
- Altura de escoamento (h) : $0,001 m$.
- Velocidade de escoamento para a inclinação de $0,025 \frac{m}{m}$ (v) : $0,0632 \frac{m}{s}$.
- Viscosidade da água (ν) : $1,0 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$.
- Coeficiente de retardamento do poluente (R) : 1.
- Difusão molecular do poluente (D_0) : $2,933 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$.

⁷Foi utilizado neste estudo o seguinte *software* :

- Mupad - *software* de matemática de distribuição grátis para a actividade científica não comercial, desenvolvido na Universidade de Paderborn na Alemanha. Utilizado na determinação da massa de poluentes perdidos no modelo físico.
- Gnuplot - *software* gráfico de natureza científica de distribuição pública (*GNU software*). Utilizado no ajustamento do modelo exponencial ao modelo físico e no traçado dos gráficos. Utiliza como algoritmo de ajustamento, o método dos mínimos quadrados não linear de Marquardt-Levenberg.

Este *software* pode ser obtido através de *Download* da internet, incluindo os manuais.

Utilizando o programa de matemática *MuPad* obteve-se a massa acumulada de poluente dissolvido libertado para o escoamento em função do tempo. Posteriormente, ajustou-se o modelo exponencial à curva anteriormente obtida com o programa *GNUPlot*, tendo-se obtido $c = 0,0348921$.

A equação exponencial que traduz a perda de poluente para as condições do modelo de Parr [48] é a seguinte :

$$P = P_0 (1,0 - e^{-0,03489 \cdot R}) \quad (3.45)$$

A representação gráfica deste exemplo pode ser observada na figura (3.4) (pag. 46). Verifica-se que o modelo exponencial acompanha o comportamento do modelo físico com uma pequena margem de erro.

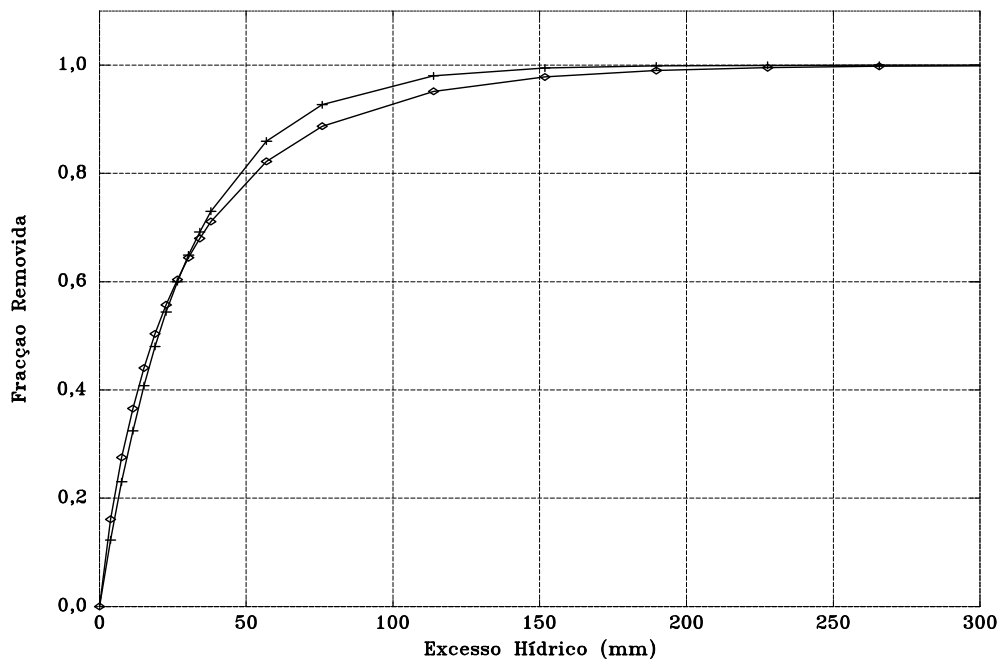


Figura 3.4: Modelo exponencial ajustado ao modelo físico. [(cruz) - Modelo exponencial (Wanielista)]. [(losango) - Modelo físico (Parr)].

3.4 Deposição contínua de poluentes

3.4.1 Deposição de poluentes em zonas urbanas

A massa de poluente disponível para ser arrastada é função da deposição média diária durante o período de estiagem considerado.

Novotny [46] defende que a acumulação de um poluente pode ser dada pela seguinte expressão :

$$\frac{dP}{dt} = I - wP \quad (3.46)$$

onde,

I - entrada de poluente, $\frac{kg}{m^2 \cdot dia}$.

P - acumulação de poluente, $\frac{kg}{m^2}$.

w - factor que representa a remoção de poluente, $\frac{1}{dia}$.

A solução analítica da equação anterior é dada por :

$$P_t = \frac{I}{w} (1 - e^{-wt}) + P_0 e^{-wt} \quad (3.47)$$

Onde,

P_0 - carga de poluente em t_0 .

P_t - carga de poluente em t .

Segundo Novotny[46], o ponto de equilíbrio entre a deposição e a remoção, *i.e.*, o ponto a partir do qual a remoção é equivalente à deposição, é dado por :

$$P_{eq} = \frac{I}{w} \quad (3.48)$$

Novotny [46] faz referência a esta metodologia para as zonas urbanas onde a deposição (I) de poluentes pode ser atribuída a :

- Deposição atmosférica por via seca.
- Resíduos sólidos urbanos.
- Vegetação.
- Tráfego.

A deposição de poluentes, junto aos passeios nas ruas, pode ser estimada pela seguinte expressão [47]:

$$I = I_L + I_A + I_T = L + \frac{A \cdot LR}{2} + \frac{ET + DT + CP}{2} \quad (3.49)$$

Onde,

I - deposição de poluentes, $\frac{g}{m \cdot dia}$.

I_L - deposição devida ao lixo.

I_A - deposição atmosférica.

I_T - deposição pelo tráfego.

L - deposição de lixo, $\frac{g}{m \cdot dia}$.

A - deposição atmosférica por via seca, $\frac{g}{m^2 \cdot dia} = \frac{ton}{km^2 \cdot dia}$.

LR - largura da rua, m .

ET - taxa de emissão pelo tráfego, $\frac{g}{eixo \cdot m}$.

DT - densidade de tráfego, $\frac{eixos}{dia}$.

CP - condição do pavimento da estrada.

A remoção (w) de poluentes pode ser relacionada com [46]:

- Velocidade do vento.
- Altura dos passeios.
- Intensidade e velocidade de tráfego.

- Características das zonas que circundam o local em estudo.

(w) pode ser estimado com a seguinte expressão [47] :

$$w = 0,011 \cdot e^{-0,08 \cdot H} \cdot (VT + VV) \quad (3.50)$$

Onde,

H - altura do passeio, cm .

VT - velocidade do tráfego, $\frac{km}{h}$.

VV - velocidade do vento, $\frac{km}{h}$.

O valor de (w) é empírico [46]. Com base em dados obtidos numa bacia hidrográfica experimental, localizada na zona metropolitana de Milwaukee, a qual é caracterizada como uma zona residencial de média intensidade e moderado tráfego, Novotny *et al.* in Novotny [46] obtiveram valores de coeficiente de remoção constantes, atingindo valores de ($w = 0,2-0,4 \frac{1}{dia}$), isto significa que (20 %) a (40%) dos sólidos acumulados junto ao passeio na superfície da rua são removidos diariamente com o vento e pelo tráfego [46].

Estudos feitos em Londres demonstraram que o equilíbrio é atingido em quatro ou cinco dias quando a ressuspensão dominante é feita pelo tráfego [46].

Novotny [46] refere que se for assumido que o equilíbrio é atingido quando (e^{-wt}) atinge ($0,02 - 0,05$), ou seja, um t_{eq} de quatro a seis dias, então (w) assume valores de ($0,5-1,0 \frac{1}{dia}$).

A ressuspensão é desprezável em zonas de tráfego muito intenso [46].

Se ($w = 0,0 \frac{1}{dia}$), então a acumulação de matéria é linear até ao próximo acontecimento meteorológico, ou à remoção das partículas pela limpeza das ruas [46].

Estudos efectuados por Kobriger (1984) in Novotny [46] demonstram que a deposição de poluentes em zonas adjacentes às autoestradas, são devidas a :

- Tráfego médio diário.
- Velocidade e direcção do vento.
- Cargas de superfície disponíveis.
- Características do terreno e da paisagem.

3.4.2 Deposição de poluentes em zonas rurais

O princípio atrás referenciado pode ser aplicado para zonas rurais.

Neste caso a deposição pode ser atribuída às actividades agrícola e pastorícia.

No primeiro caso (actividade agrícola), a deposição é um fenómeno discreto que é função do tipo de plantação e das práticas de adubação e aplicação de pesticidas, herbicidas e fungicidas. No caso de pastagens, trata-se de um fenómeno contínuo que é função da carga e tipo de animais por unidade de área (*e.g.*: hectare).

O valor a atribuir ao parâmetro (w) tem a ver com a velocidade de degradação destes

compostos.

No caso dos compostos de características biodegradáveis (*e.g.*: CBO), esse valor é função da absorção dos compostos pelas plantas ou da biodegradação provocada pelo meio e pode ser estimado.

Se o coeficiente (w) estiver associado à biodegradação, esta depende da temperatura, e o valor de (w) pode ser ajustado pela seguinte expressão:

$$w = w_{20} \cdot \theta^{T-20} \quad (3.51)$$

Onde,

θ - coeficiente.

w_{20} - velocidade de reacção à temperatura 20 °C, $\frac{1}{d}$.

w - velocidade de reacção, $\frac{1}{d}$.

O valor de (w) depende do tipo de poluente e das condições a que a superfície que o contém está sujeita.

No caso de outros compostos similares a pesticidas, podemos obter o valor de (w) utilizando o conceito de meia vida que está associado a cada tipo de composto.

Por definição, meia vida é o tempo necessário para que o número de núcleos não desintegrados se reduza a metade do número de núcleos iniciais $t_{0,5}$.

$$\begin{aligned} P &= P_0 \cdot e^{-w \cdot t} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{P_0}{2} &= P_0 \cdot e^{-w \cdot t_{0,5}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2} &= e^{-w \cdot t_{0,5}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 2 &= e^{w \cdot t_{0,5}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln 2 &= w \cdot t_{0,5} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow w &= \frac{\ln 2}{t_{0,5}} \end{aligned} \quad (3.52)$$

No quadro (A.3) (pag. 112) estão apresentados valores característicos associados à meia vida de alguns pesticidas (Aldrina, Clordano, DDT, Dieldrina, Heptacloro e Lindano).

3.5 Modelação da erosão

Nas zonas rurais, a quantificação de sedimentos não pode ser obtida com o modelo exponencial, uma vez que este tem natureza infinita, não permite definir a quantidade de sedimentos disponíveis para ser arrastados, uma vez que estes são gerados pelo próprio fenómeno hidrológico, associado a:

- Natureza do solo.
- Ocupação do solo.
- Práticas de cultivo do solo.
- Práticas de conservação do solo.

- Intensidade da chuva.

Para a determinação da massa de sedimentos pode ser utilizada a conhecida Equação Universal da Perda de Solo (*USLE - Universal Soil Loss Equation*) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3.53)$$

Onde,

A - erosão unidade de área, $\frac{t}{ha}$.

R - índice de erosividade da chuva⁸, $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}$.

K - factor de erodibilidade do solo⁹, $\frac{t}{ha} \cdot \frac{ha \cdot h}{MJ \cdot mm}$.

L - factor de longitude¹⁰.

S - factor de inclinação¹¹.

C - factor de cultivo¹².

P - factor de conservação¹³.

Wischmeier (1976) *in* Novotny *et al.* refere que a aplicação da USLE origina um erro ($CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$) de 12 % para a previsão anual. Na aplicação a uma chuvada é de esperar um erro superior.

3.5.1 Índice de erosividade da chuva (R)

Segundo Novotny [46], o factor de energia da chuva (R) é igual ao somatório da energia das chuvadas no período considerado.

A energia da chuva é dada por :

$$E = \sum_i (E_c)_i h_i \quad (3.54)$$

Onde,

E_c - energia cinética, $\frac{MJ}{ha \cdot mm}$.

h_i - altura de chuva no intervalo de tempo (i), mm .

Foster *et al.* (1981) *in* Cardoso [11] e Schwab [63] referem que a energia cinética da chuva no período considerado é dada pelas seguintes expressões:

Para $I_i \leq 76mm \cdot h^{-1}$.

$$(E_c)_i = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I_i \quad (3.55)$$

Para $I_i \geq 76mm \cdot h^{-1}$.

$$(E_c)_i = 0,283 \quad (3.56)$$

Onde,

I_i - intensidade pluviométrica no intervalo considerado, $\frac{mm}{h}$.

⁸ R - um valor que indica a erosividade da chuva numa escala baseada no índice EI_{30} .

⁹ K - um valor que reflete a propensão do solo sofrer um certo tipo de erosão.

¹⁰ L - uma relação que compara a perda de solo com a de um campo experimental de 22,6 m.

¹¹ S - uma relação que compara a perda de solo com a de um campo experimental com a inclinação de 9 %.

¹² C - uma relação que compara a perda de solo com um campo experimental em condições pré-fixadas.

¹³ P - uma relação que compara a perda de solo com a de um campo em que não se realiza qualquer prática de conservação (*e.g.*: cultivado no sentido da pendente).

Para uma única chuvada, o factor de erosividade é dado por :

$$R_r = E \cdot I_{30} \quad (3.57)$$

Onde,

R_r - índice de erosividade da chuva, $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}$.

i - intervalo de chuva do hietograma.

h_i - altura de chuva no intervalo de tempo (i), mm .

I_{30} - intensidade máxima de chuva ocorrida na chuvada durante 30 min, $\frac{mm}{h}$.

I_i - intensidade pluviométrica no intervalo de tempo (i), $\frac{mm}{h}$.

3.5.1.1 Modificações no índice de erosividade (R)

Foster, Meyer e Onstad (1977) *in* Novotny [46, 47] propuseram uma modificação no índice de erosividade da chuva que permite contabilizar o efeito de erosão associado ao escoamento.

$$R = a \cdot R_r + b \cdot c \cdot Q \cdot q^{\frac{1}{3}} \quad (3.58)$$

Onde,

R - índice de erosividade, $\frac{MJ \cdot cm}{ha \cdot h}$.

R_r - índice de erosividade da chuva, $\frac{MJ \cdot cm}{ha \cdot h}$.

a, b - parâmetros, ($a + b = 1$).

c - coeficiente, $c = 15$.

Q - volume escoado, cm .

q - caudal máximo, $\frac{cm}{h}$.

A equação modificada ficará com a seguinte configuração :

$$R = 0,5 \cdot R_r + 7,5 \cdot Q \cdot q^{\frac{1}{3}} \quad (3.59)$$

Williams e Berndt (1977) *in* Novotny *et al.* [47] propuseram a Equação Universal da Perda de Solo Modificada (MUSLE), onde o factor de erosividade da chuva é substituído pelo factor de erosividade do escoamento que é proporcional a $(Q \cdot q)^{0,56}$

3.5.2 Factor de erodibilidade do solo (K)

(K) pode ser obtido através do nomograma apresentado na figura (3.5) ou ainda, de acordo com Pimenta [50] e Schwab [63] através da seguinte expressão :

$$K = 2,8 \cdot 10^{-7} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (s - 2) + 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot (p - 3) \quad (3.60)$$

Onde,

OM - matéria orgânica, %.

M - parâmetro que define o tamanho das partículas.

s - classe de estrutura.

p - classe de permeabilidade.

O parâmetro M é obtido da seguinte forma :

$$M = [limo(\%) + areia.fina(\%)] [100 - argila(\%)] \quad (3.61)$$

$$argila(\%) = 100 - limo(\%) - areia.fina(\%) - areia.grossa(\%) \quad (3.62)$$

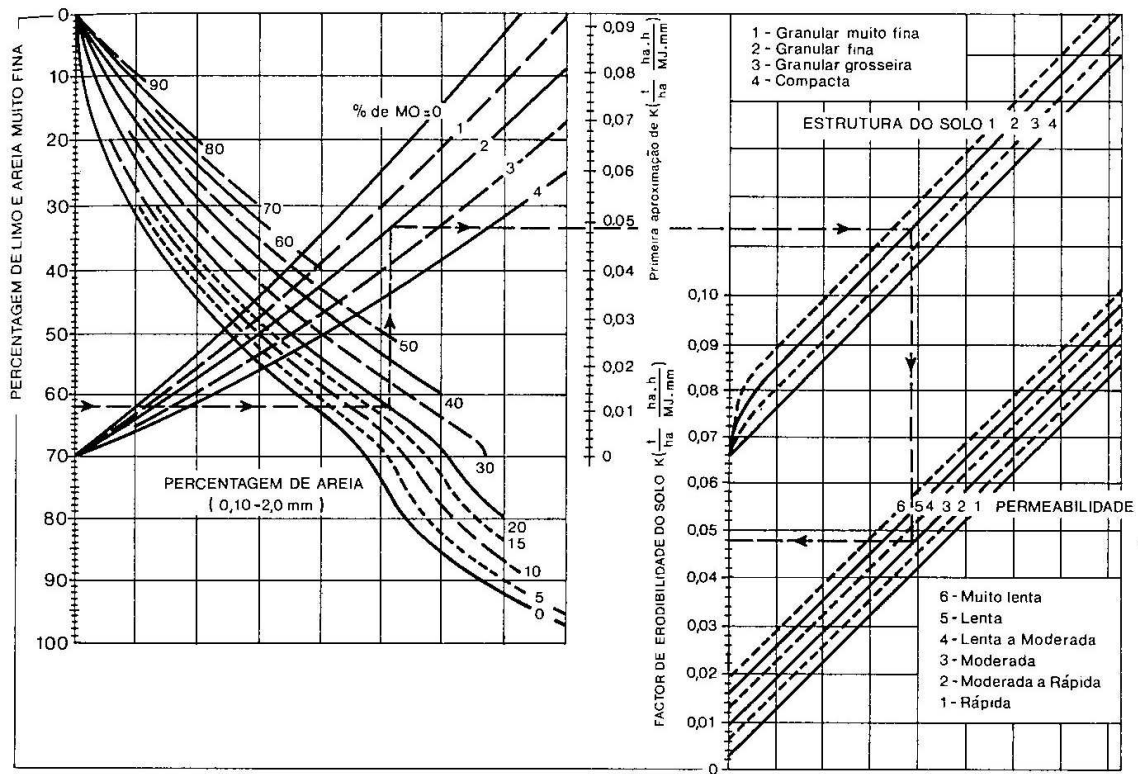


Figura 3.5: Nomograma para a determinação do factor de erodibilidade do solo (K). Foster *et al* in Cardoso[11].

Com esta expressão, o valor de K vem expresso em unidades SI ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$). Para a transformar em unidades métricas basta multiplicar pela aceleração da gravidade ($9,81 \frac{m}{s^2}$)[50].

De acordo com Pimenta [50], esta expressão não deve ser aplicada a solos com um teor de limo superior a 70 %.

Para a definição das classes de permeabilidade (s) deverá ser consultado o quadro (3.1) (pag. 53) desenvolvido pela ARS¹⁴-USDA¹⁵(1994) *in* Rosewell [59]. Cada uma das classificações pode ser obtida pelo monograma de Foster, apresentado na figura (3.5), a partir da granulometria do solo. A classe de estrutura (p) é definida de acordo com a classificação apresentada no quadro (3.2) (pag. 53).

3.5.3 Factor de longitude (L) e de inclinação (S)

Os factores (L) e (S) são função do escoamento superficial e podem ser dados pela seguinte expressão :

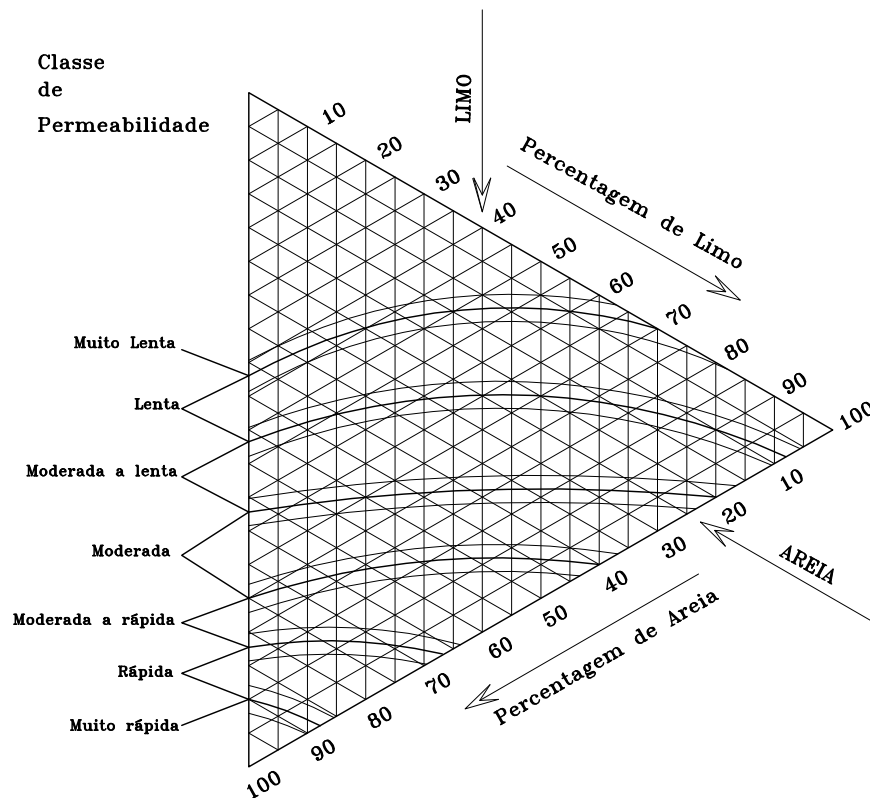
$$L = \left(\frac{\lambda}{22,10} \right)^m \quad (3.63)$$

¹⁴Agricultural Research Service

¹⁵United States Department of Agriculture

Tabela 3.1: Classes de permeabilidade (ARS - USDA (1994) *in* Rosewell [59])

Classe	Descrição	Permeabilidade ($\frac{mm}{h}$)
1	Rápida	> 130
2	Moderada a rápida	60 - 130
3	Moderada	20 - 60
4	Lenta a moderada	5 - 20
5	Lenta	1 - 5
6	Muito lenta	< 1

Figura 3.6: Classificação do solo quanto à sua permeabilidade. SCS (1977) *in* Pimenta [50]Tabela 3.2: Classes de estrutura (ARS - USDA (1994) *in* Rosewell [59])

Classe	Descrição	Diâmetro (mm)
1	Granular muito fina	< 1
2	Granular fina	1 - 2
3	Granular grosseira	2 - 10
4	Compacta	—

$$S = 0,065 + 0,04579 \cdot s_e + 0,0065 \cdot s_e^2 \quad (3.64)$$

Onde,

λ - comprimento da encosta ¹⁶, m.

L - factor de comprimento.

s_e - inclinação média da superfície de escoamento, %.

m - parâmetro dependente da inclinação do terreno.

A (m) podem ser atribuídos os seguintes valores :

$m = 0,2$ para $s_e \leq 0,1$ %.

$m = 0,3$ para s_e de 1 % a 3 %.

$m = 0,4$ para s_e de 3,5 % a 4,5 %.

$m = 0,5$ para $s_e \geq 5,0$ %.

Para o caso de encosta com declive variável, como é o caso aplicado ao modelo em causa, Cardoso [11] refere que o procedimento descrito para determinar o factor fisiográfico (LS) não pode ser aplicado directamente. Uma encosta de comprimento λ é dividida em n segmentos de declive uniforme e comprimento qualquer¹⁷. O factor fisiográfico é dado por :

$$LS = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i S_i}{\lambda} \quad (3.65)$$

Onde S_i corresponde ao factor declive relativo ao segmento i e δ_i e pode ser determinado pela expressão :

$$\delta_i = \frac{\lambda_i^{m_i+1} - \lambda_{i-1}^{m_{i-1}+1}}{22,1^{m_i}} \quad (3.66)$$

Onde,

λ_i - distância entre o topo da encosta e a extremidade jusante do troço (i).

m_i - expoente m do troço (i).

3.5.4 Factor de técnica cultural (C)

Os valores relativos aos factores de técnica cultural podem ser consultados no apêndice (C) (pag. 119).

3.5.5 Factor de prática de conservação do solo (P)

Schwab [63] refere que o factor de prática de conservação do solo pode ser obtido pela expressão :

$$P = P_c \cdot P_s \cdot P_t \quad (3.67)$$

Onde,

P_c ¹⁸ - factor de contorno¹⁹ baseado no declive no quadro (3.3) (pag. 55).

¹⁶Deve ser considerado desde do ponto de origem do escoamento até ao ponto onde diminui a inclinação do terreno e se inicia a deposição dos sedimentos.

¹⁷Este princípio é aplicável à forma como a bacia hidrográfica está fisicamente modelada, *i.e.*, entre duas células temos uma declividade constante

¹⁸Para o caso da cultura ser segundo a maior declividade da encosta o valor de $P_c = 1,0$. No caso de cultura em faixa o valor do comprimento máximo do declive é o dobro da cultura em contorno. Quadro (3.3) (pag. 55).

¹⁹Do inglês *contouring factor*, consiste na prática de lavar, plantar, cultivar e colher segundo a curva de nível do terreno.

Tabela 3.3: Factor de contorno - P_c , Wischmeier e Smith (1978) *in* Schwab [63]

Declive (%)	P_c	Comprimento Máximo do Declive (m)	Largura Máxima das Faixas de Cultivo (m)
1 - 2	0,6	120	40
3 - 5	0,5	90	30
6 - 8	0,5	60	30
9 - 12	0,6	36	24
13 - 16	0,7	24	24
17 - 20	0,8	18	18
21 - 25	0,9	15	15

P_s - factor de cultivo em faixa ²⁰.

P_t - factor de sedimentação em terraço ²¹.

Rosewell [59] no modelo SOILOSS ajusta P de acordo com a seguinte expressão :

$$P = P_c + 0,4 \cdot (1 - P_c) \quad (3.68)$$

3.6 Produção de sedimentos

A USLE quantifica os sedimentos erodidos, mas estes podem ser arrastados de um ponto da bacia hidrográfica e depositados mais a jusante sem sair desta. A determinação da carga de sedimentos que sai da bacia hidrográfica é de grande interesse para a quantificação da poluição difusa.

Para a determinação da parcela de sedimentos erodidos que são transportados para fora da bacia hidrográfica (sedimentos produzidos), Roehl(1962) *in* Cardoso [11] refere que esta pode ser determinada pela seguinte expressão :

$$A_p = \frac{C_{ps} \cdot A}{100} \quad (3.69)$$

Onde,

A_p - quantidade de sedimentos produzidos.

A - sedimentos erodidos (USLE).

C_{ps} - coeficiente de produção de sedimentos.

O coeficiente de sedimentos produzidos pode ser obtido por três equações empíricas desenvolvidas por Roehl (1962):

$$\log C_{ps} = 1,714 - 0,339 \log A_b \quad (3.70)$$

²⁰Prática de plantar faixas alternadas de diferentes culturas num mesmo campo, para larguras de faixa recomendadas no quadro (3.3) (pag. 55)(1,0 para apenas contorno ou faixas alternadas de milho e cereais; 0,75 para quatro anos de rotação com dois cultivados em linha; 0,50 para quatro anos de rotação com um cultivado em linha).

²¹(1,0 para a não existência de terraços; 0,2 para terraços com canais de drenagem para o exterior; 0,1 para terraços com drenos subterrâneos para o exterior)

$$\log C_{ps} = 1,494 - 0,648 \log L_b \quad (3.71)$$

$$\log C_{ps} = 4,365 - 0,230 \log A_b - 0,510 \log \frac{L_b}{H_b} - 0,278 \log R_b \quad (3.72)$$

Onde,

A_b - área da bacia hidrográfica, km^2 .

L_b - comprimento da linha de água, km .

H_b - máxima amplitude de cotas entre a cabeceira da bacia e a secção de referência, km .

R_b - razão de bifurcação da rede de drenagem.

A razão de bifurcação da rede de drenagem R_b é obtida pela seguinte expressão :

$$R_b = (N_1)^{\frac{1}{n-1}} \quad (3.73)$$

Onde,

n - maior número de ordem da rede hidrográfica.

N_1 - número de linhas de água de primeira ordem.

De acordo com Cardoso [11], as equações empíricas de Roehl foram obtidas a partir de dados de 25 bacias hidrográficas do Sudoeste dos Estados Unidos com as seguintes características:

- Área - 5 km^2 a 430 km^2 .
- $\frac{L_b}{H_b}$ - 28 a 330.
- R_b - 3,28 a 4,92.

Segundo Roehl, a equação (3.72) é a mais precisa. No entanto, esta nem sempre é aplicável, uma vez que, para pequenas bacias hidrográficas o valor de C_{ps} pode atingir valores superiores a 100 %.

No modelo em estudo, a referida equação também não pode ser aplicada porque a ramificação das linhas de água é artificial, *i.e.*, depende da largura considerada para as células. Assim, uma bacia hidrográfica pode ter mais ou menos troços de primeira ordem conforme a malha considerada. Esta característica altera o valor da razão de bifurcação da bacia R_b , falseando o resultado final.

Foi admitida como expressão para determinar a produção de poluentes, a equação (3.70), porque é a que apresenta valores mais próximos da expressão (3.72) sem que com isso sofra dos problemas desta. É a expressão apontada por Novotny [46] para determinar a produção de sedimentos.

Capítulo 4

Modelação do escoamento

4.1 Modelação da bacia hidrográfica

A definição das características da bacia hidrográfica é a base para o funcionamento do modelo, *i.e.*, para que esta se assemelhe à real, deverá poder representar a sua heterogeneidade. Para o efeito modelou-se a bacia da seguinte forma :

- A bacia hidrográfica é inscrita num rectângulo.
- A bacia hidrográfica foi dividida em células de igual dimensão e com características homogéneas. Quanto mais apertada a malha de células, maior o volume de informação que pode ser contida na bacia, logo melhor a representação da heterogeneidade.
- Os limites e forma da bacia hidrográfica são definidos pela sua topografia. Às células que estão fora da bacia é-lhes atribuído o valor de (-1). As restantes células são definidas pela cota topográfica do centro de gravidade destas, figura (4.1) (pag. 58).
- A cada célula é atribuído um conjunto de propriedades que servirá para a quantificação do escoamento, erosão e poluição difusa (*e.g.*: parâmetros relativos ao escoamento, transporte de poluentes e sedimentos).

4.1.1 Definição do sentido do escoamento

O escoamento na bacia hidrográfica pode ser realizado em oito sentidos diferentes, figura (4.2) (pag. 58).

A definição do sentido do escoamento é dada pela característica do relevo. Corresponde ao troço (dos oito anteriormente referidos) que tem maior inclinação positiva. Figura (4.3) (pag. 59).

Esta forma de modelar o terreno é adequada para utilização em sistemas SIG¹ recorrendo ao modelo digital do terreno (MDT).

Este processo é adoptado por alguns autores para resolver problemas na área da hidrologia e dos recursos hídricos fazendo uso da ferramenta SIG ([64], [58]).

A metodologia utilizada para a construção da estrutura dos troços de canais da bacia

¹SIG - Sistema de informação geográfica

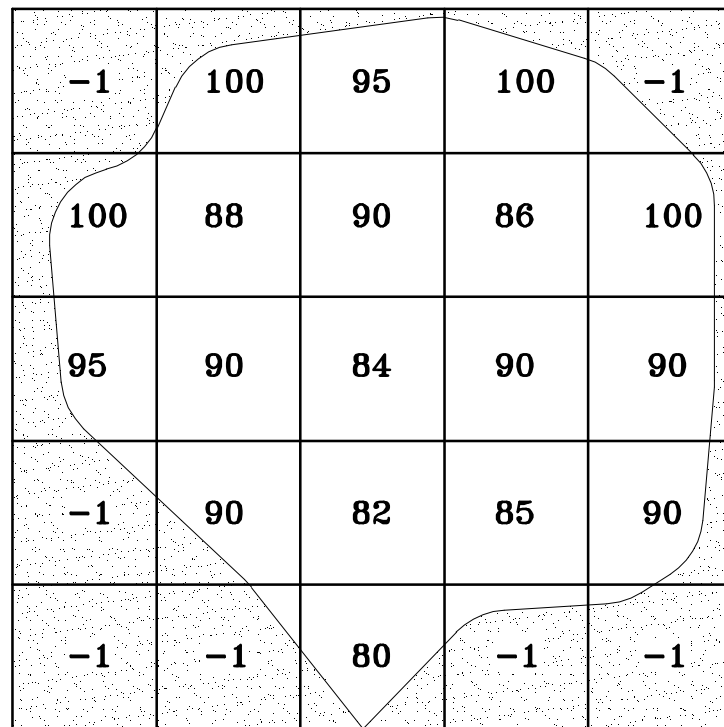


Figura 4.1: Topografia da bacia hidrográfica.

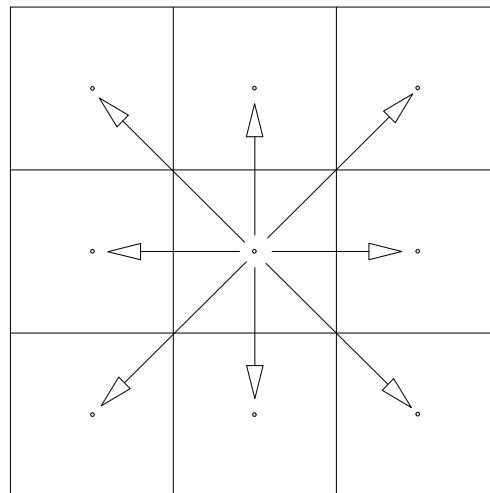


Figura 4.2: Sentidos do escoamento.

hidrográfica é a proposta por Lança [37] e por Mizgalwicz [45] na qual a posição do troço na bacia hidrográfica é definida pela numeração dos nós e o respectivo número de ordem², figura (4.5) (pag. 61).

A metodologia utilizada para a determinação do escoamento na bacia hidrográfica em cada troço consiste na soma dos volumes escoados nos troços cujo (nó 2) tenha igual numeração do (nó 1) do troço em estudo. Em suma, corresponde ao balanço de massas

²Os números de ordem são obtidos de acordo com uma hierarquia, segundo a qual as linhas de água sem afluentes são de ordem um ou de primeira ordem, as linhas de água que têm afluentes de primeira ordem são de ordem dois ou de segunda ordem e assim sucessivamente

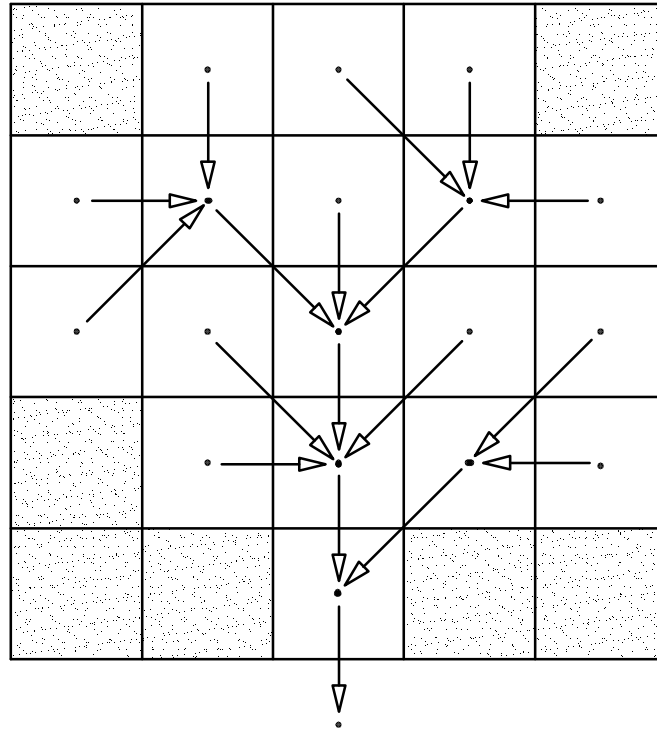
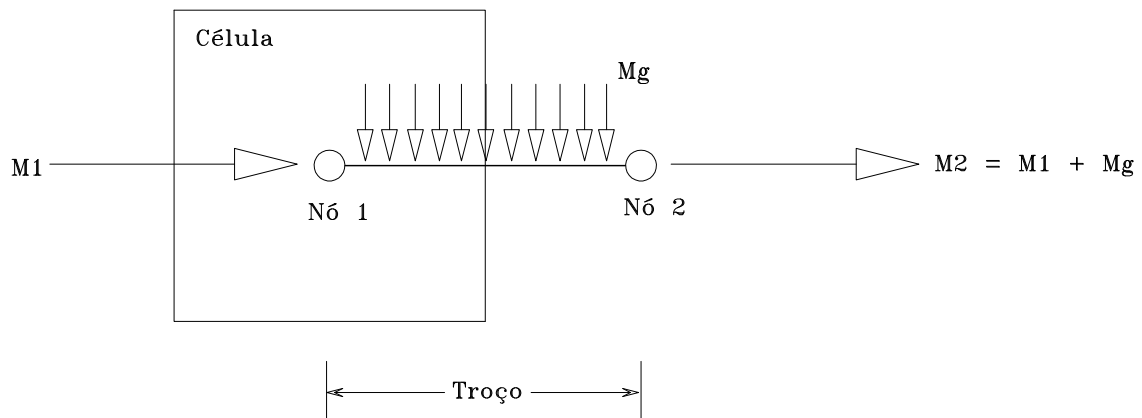


Figura 4.3: Sentidos do escoamento na bacia hidrográfica.

em cada nó, correspondendo cada nó ao centro de gravidade de cada célula. Figura (4.4) (pag. 60).

Face ao exposto passamos a explicar a metodologia utilizada.

- As células têm um afastamento constante entre elas e estão representadas com a sua cota topográfica do centro de gravidade destas. Células fora da bacia hidrográfica são definidas pela cota topográfica (-1). Todas as células estão numeradas de acordo com a sua posição na bacia hidrográfica. Este procedimento é importante para a atribuição do número dos nós em cada troço.
- Verificação, em cada célula, do troço de ligação a uma célula adjacente com maior declividade positiva. Caso se verifique essa ligação, o troço em questão é o que traduz o escoamento (considerou-se que o escoamento dá-se no sentido de maior declividade). Caso não se verifique, significa que estamos na presença de uma declividade nula, negativa ou do limite da bacia hidrográfica. Quando isto acontece, o modelo cria nós de jusante do troço fictícios representados por números negativos (contagem decrescente $[-1, \dots, -n]$). A razão da utilização desta metodologia prende-se com a possibilidade de:
 - Detecção de erros de levantamento das cotas do centro de gravidade das células, como por exemplo, células contíguas de cota igual ou célula com cota inferior às que existem em torno dela. Sempre que aparece um nó negativo no meio da bacia hidrográfica, significa que estamos na presença de um dos casos apontados anteriormente.
 - Estudo das várias bacias hidrográficas ao mesmo tempo, onde o troço de saída de cada bacia hidrográfica é representado por um número negativo. Isto permite estudar as margens de um rio ou de uma albufeira ou lago, possibilitando determinar o volume de água e entrada de poluentes de percurso no caso do rio



Nota :

- $M1$ - Massa que entra na célula.
- Mg - Massa gerada na célula.
- $M2$ - Massa que sai da célula.

Figura 4.4: Balanço de massas por célula na determinação dos volumes de escoamento e transporte de poluentes.

e quantificar os diversos volumes de água e entrada de poluentes nos diversos pontos da albufeira ou lago ao mesmo tempo. Para o estudo de um problema com estas características, onde a albufeira ou rio fica incluído na mancha de levantamento topográfico, atribuir-se-ia a cota (-1) ao interior do rio, albufeira ou lago e o modelo interpretaria como limite de bacia hidrográfica. Assim veríamos o comportamento das diversas sub-bacias do sistema.

- Ordenação dos troços segundo o seu número de ordem, figura (4.5) (pag. 61). Esta reordenação é importante para a determinação da ordem de cálculo do escoamento dentro da bacia hidrográfica. A sequência da verificação do princípio da conservação da massa é realizada dos troços de menor para maior ordem. A determinação dos caudais de entrada num dado troço de ordem (n), é feita pela soma dos caudais de saída de troços de ordem ($n-1$) cujos nós de saída (nó 2) tenham o mesmo número do nó de entrada (nó 1) desse troço.

4.2 Determinação da precipitação efectiva

O primeiro passo na determinação do escoamento na bacia hidrográfica é identificar a parcela da precipitação que contribui para o escoamento superficial. Trata-se de um fenómeno com alguma complexidade porque depende de um conjunto de factores, tais, como: humidade do solo, permeabilidade, cobertura natural ou artificial.

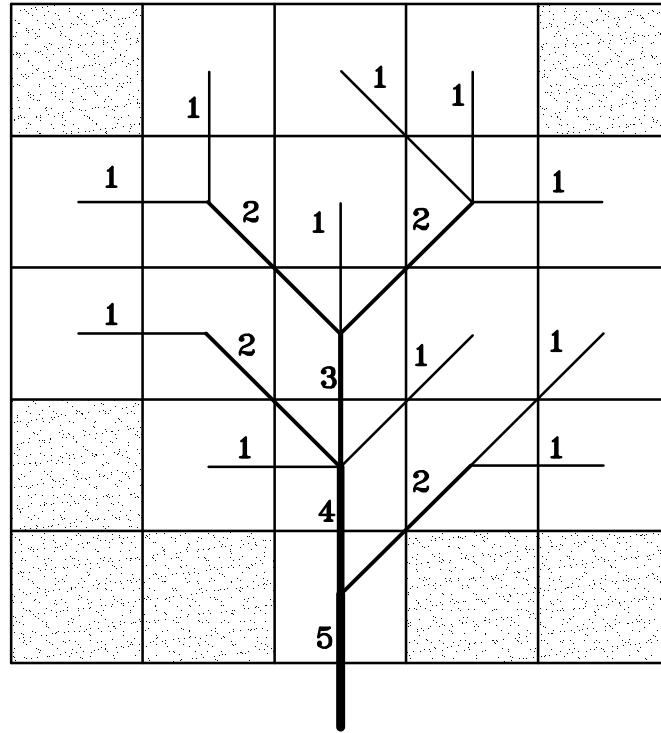


Figura 4.5: Rede de drenagem da bacia hidrográfica e classificação do número de ordem das linhas de água.

Para a determinação da precipitação efectiva utilizou-se o método proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS), uma vez tratar-se de um método já bastante testado e de fácil aplicação no terreno.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_e} \quad (4.1)$$

Onde,

F - infiltração real, mm.

S - infiltração potencial, mm.

Q - precipitação efectiva, mm.

P_e - escoamento potencial, mm.

$$F = P_e - Q \quad (4.2)$$

$$I_a = \alpha \cdot S \quad (4.3)$$

Onde,

I_a - abstracção inicial, mm.

α - coeficiente.

I_a corresponde a toda a chuva caída antes de se dar início ao escoamento.

O valor (α) geralmente assume o valor de (0,2). O Correia [18, 19] refere que este pode variar entre 0,1 e 0,4.

$$\begin{aligned} P_e &= P - I_a \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_e &= P - \alpha \cdot S \end{aligned} \quad (4.4)$$

Onde,

P - precipitação total, mm.

Tomando a equação (4.1):

$$\begin{aligned}
 & \Leftrightarrow \frac{F}{S} = \frac{Q}{P_e} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \frac{P_e - Q}{S} = \frac{Q}{P_e} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \frac{(P - I_a) - Q}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow ((P - I_a) - Q) \cdot (P - I_a) = Q \cdot S \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow (P - I_a)^2 - Q \cdot (P - I_a) = Q \cdot S \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow (P - I_a)^2 = Q \cdot S + Q \cdot (P - I_a) \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow (P - I_a)^2 = Q \cdot (S + P - I_a) \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

O número de escoamento, designado por CN ³ para as condições de cobertura do solo está relacionado com S através da seguinte expressão :

$$\begin{aligned}
 CN &= \frac{25400}{S + 254} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow S &= \frac{25400}{CN} - 254
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

O CN é um número adimensional teoricamente compreendido entre zero (para uma bacia de condutividade hidráulica infinita) e 100 (para uma bacia totalmente impermeável). Então a precipitação efectiva é dada por :

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + \frac{25400}{CN} - 254} \tag{4.7}$$

Os valores de CN obtidos nas tabelas devem ser corrigidos tendo em conta as condições anteriores de teor em água no solo.

- AMC I - solos secos mas não abaixo do ponto de emurchecimento das plantas. Esta condição de humidade do solo corresponde a uma precipitação total nos cinco dias antecedentes de (< 13 mm) no período dormente e de (< 36 mm) no período de crescimento.
- AMC II - a humidade no solo corresponde à capacidade de campo. A capacidade de campo corresponde ao teor de água no solo que resiste aos efeitos de gravidade (drenagem). Esta condição de humidade do solo corresponde a uma precipitação total nos cinco dias antecedentes de (13-28 mm) no período dormente e de (36-53 mm) no período de crescimento.
- AMC III - solo muito encharcado, quase saturado (condições de empoçamento), originado por chuvas persistentes durante pelo menos nos cinco dias anteriores. Esta condição de humidade do solo corresponde a uma precipitação total nos cinco dias antecedentes de (> 28 mm) no período dormente e de (> 53 mm) no período de crescimento.

³CN : do inglês *curve number* ou *complex number*

Chow [15] apresenta as expressões que transformam os valores de CN de AMCII para AMCI ou AMCIII.

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN(II)} \quad (4.8)$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,13 \cdot CN(II)} \quad (4.9)$$

O valor de infiltração pode ser obtido pela seguinte expressão :

$$F = \frac{S}{1 + \frac{S}{P-I_a}} \quad (4.10)$$

A taxa de infiltração (I) pode ser obtida pela seguinte expressão :

$$I = \frac{dF}{dt} = \frac{S^2 \cdot r}{(P - I_a + S)^2} \quad (4.11)$$

4.2.1 Abstracção inicial

O valor usualmente utilizado para determinar a abstracção inicial, que representa as perdas iniciais antes de se dar início ao escoamento corresponde a 20 % da infiltração potencial da célula.

$$(I_a) = 0,2 \cdot S \quad (4.12)$$

Onde,

(I_a) - variável de abstracção inicial da célula (i), *mm*.

S - infiltração potencial na célula (i), *mm*.

Como o modelo proposto é sensível à chuva efectiva utilizou-se uma formulação mais elaborada para determinar a abstracção inicial (I_a).

Correia [18] refere que a parcela relativa à intercepção e à retenção, são de quantificação bastante difícil, mas pode-se admitir com segurança que corresponde a um valor bastante pequeno comparado com a infiltração ocorrida até à saturação da camada superficial do solo que se pode representar por W_p . Assim podemos dizer sem grande erro que :

$$I_a = W_p \quad (4.13)$$

Se admitirmos esta igualdade podemos utilizar uma metodologia desenvolvida por Mein e Larson (1973) *in* Correia [18].

Segundo estes autores, o tempo que decorre até à saturação da camada superficial do solo, para uma intensidade de precipitação constante é dado por :

$$t_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{S_f}{\frac{r}{K} - 1} \quad (4.14)$$

Onde,

(t_p) - tempo que decorre até à saturação do solo, *h*.

S_f - factor de sucção.

r - intensidade de precipitação suposta constante, $\frac{mm}{h}$.

K - condutividade saturada do solo, $\frac{mm}{h}$.

A altura de água infiltrada é dada por :

$$W_p = r \cdot t_p = \frac{S_f}{\frac{r}{K} - 1} \quad (4.15)$$

A factor de sucção do solo (S_f) está relacionado com a sorptividade, representado por (S_p).

$$S_f = \frac{S_p^2}{2 \cdot K} \quad (4.16)$$

Para uma fácil obtenção de (K) e (S_p), Morel-Seytoux e Verdin (1980) *in* Correia [18] estabeleceram as seguintes expressões :

- $CN > 75$:

$$K \left(\frac{mm}{h} \right) = 8,052 - 0,08052 \cdot CN \quad (4.17)$$

- $36 < CN \leq 75$:

$$K \left(\frac{mm}{h} \right) = 31,394 - 0,391 \cdot CN \quad (4.18)$$

- $CN \leq 36$:

$$K \left(\frac{mm}{h} \right) = 47,066 - 0,823 \cdot CN \quad (4.19)$$

- $CN > 65$:

$$S_p \left(\frac{mm}{h^{\frac{1}{2}}} \right) = 60,115 - 0,601 \cdot CN \quad (4.20)$$

- $CN \leq 65$:

$$S_p \left(\frac{mm}{h^{\frac{1}{2}}} \right) = 30,251 - 0,146 \cdot CN \quad (4.21)$$

Tabela 4.1: Valores da abstracção inicial (I_a) em função do número de escoamento (CN) e a intensidade pluviométrica (r).

r ($\frac{mm}{h}$)	CN									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
1	—	—	—	—	—	—	—	—	93,17	0,21
5	—	—	—	—	—	—	166,81	21,37	4,33	0,04
10	—	—	—	—	—	111,78	27,24	8,63	1,97	0,02
15	—	—	—	—	83,45	32,68	14,83	5,41	1,28	0,01
20	—	—	—	70,17	32,29	19,14	10,19	3,94	0,95	0,01
25	—	—	127,54	32,22	20,02	13,53	7,76	3,10	0,75	0,01
30	—	—	43,89	20,91	14,51	10,47	6,27	2,55	0,62	0,01
35	—	85,00	26,51	15,48	11,37	8,53	5,26	2,17	0,53	0,01
40	356,07	39,76	18,99	12,29	9,35	7,20	4,53	1,89	0,46	0,00
45	67,24	25,95	14,79	10,19	7,94	6,23	3,97	1,67	0,41	0,00
50	37,12	19,26	12,11	8,70	6,90	5,49	3,54	1,50	0,37	0,00
$I_a = 0,2 \cdot S$	457,20	203,20	118,53	76,20	50,80	33,87	21,77	12,70	5,64	0,51

Na tabela 4.1 podemos ver a evolução dos valores relativos a I_a para diferentes valores de número de escoamento (CN) e intensidades de precipitação (r). Na mesma tabela podemos comparar com o valor usualmente utilizado ($I_a = 0,2 \cdot S$).

4.2.2 Classificação do solo

Do ponto de vista da geotécnica, o solo é dividido em argila, silte e areia. Como a bibliografia associada a esta temática, referencia-se com uma classificação de solo de natureza agronómica, que substitui o silte por limo, esta será a classificação utilizada.

De acordo com Caputo [9], limo, foi o termo proposto para substituir *barro*, que corresponde a *loam* no inglês. Trata-se de uma mistura de proporções variadas de partículas de areia, silte e argila. Novotny [46] refere que um solo que contenha 40 % de areia e 40 % de silte é classificado de limo. De acordo com a classificação de Wischmeier (1978) na tabela (4.2), a gama granulométrica associada ao limo é semelhante à usualmente utilizada para classificar o silte (0,002 mm a 0,06 mm) [17].

Para a determinação da chuva efectiva, o SCS divide o solo, quanto às suas características, em quatro tipos [19][38]:

- Tipo A (baixo potencial de escoamento superficial) - solos que dão origem a um baixo escoamento directo ou que apresentam permeabilidade elevada. Inclui areias muito profundas com pouco limo ou argila. Estes solos apresentam intensidades de infiltração elevadas, mesmo quando completamente humedecidos, correspondendo a uma transmissividade elevada. De acordo com Rawls *et al.*(1982) *in* Debo [20] correspondem aos solos a seguir referenciados com as respectivas taxas de infiltração mínima :
 - Areia - $210 \frac{mm}{h}$
 - Areia limosa - $61 \frac{mm}{h}$
- Tipo B (potencial de escoamento superficial abaixo da média) - solos menos permeáveis que os do tipo A. Inclui fundamentalmente solos arenosos menos profundos que os do tipo A. Estes solos apresentam uma permeabilidade superior à média e intensidades de infiltração moderadas quando completamente humedecidos, correspondendo a uma transmissividade média. De acordo com Rawls *et al.*(1982) *in* Debo [20] correspondem aos solos a seguir referenciados com as respectivas taxas de infiltração mínima :
 - Limo arenoso - $26 \frac{mm}{h}$
 - Limo - $13 \frac{mm}{h}$
- Tipo C (potencial de escoamento acima da média) - solos originando escoamento directos superiores à média e aos originados pelos tipos anteriores. Inclui solos pouco profundos e solos com quantidades apreciáveis de argila ou com camadas inferiores impermeáveis. Estes solos apresentam baixas intensidades de infiltração quando completamente humedecidos, correspondendo assim a uma transmissividade muito baixa. De acordo com Rawls *et al.*(1982) *in* Debo [20] correspondem a solos a seguir referenciados com as respectivas taxas de infiltração mínima :
 - Silte e limo - $6,9 \frac{mm}{h}$
 - Areia, argila e limo - $4,3 \frac{mm}{h}$
- Tipo D (elevado potencial de escoamento superficial) - solos contendo argilas expansivas e alguns solos pouco profundos com sub-horizontes quase impermeáveis que originam escoamentos directos ou ainda que, apresentam um nível freático permanente próximo da superfície. Estes solos possuem intensidades de infiltração muito

baixas quando completamente humedecidos, correspondendo assim a uma transmissividade muito baixa. De acordo com Rawls *et al.* (1982) *in* Debo [20] correspondem a solos a seguir referenciados com as respectivas taxas de infiltração mínima :

- Limo argiloso - $2,3 \frac{mm}{h}$
- Limo argilo-siltoso - $1,5 \frac{mm}{h}$
- Argila arenosa - $1,3 \frac{mm}{h}$
- Argila siltosa - $1,0 \frac{mm}{h}$
- Argila - $0,5 \frac{mm}{h}$

De acordo com o S.C.S. da U.S.D.A, as classes de permeabilidade do solo podem classificar-se em [46] :

- A - permeabilidade muito rápida.
- B - permeabilidade rápida e rápida a moderada.
- C - permeabilidade moderada e moderada a lenta.
- D - permeabilidade lenta e muito lenta.

Cruzando-se esta informação como o diagrama de permeabilidade do solo do S.C.S., figura (3.6) (pag. 53), chegou-se ao gráfico apresentado na figura (4.7) (pag. 68) que representa os quatro tipos de solo classificados pelo SCS (A, B, C e D) em forma gráfica.

Tabela 4.2: Componentes do solo (Cardoso (1965) e Wischmeier (1978) *in* Pimenta [50])

	Cardoso, 1965 (mm)	Wischmeier, 1978 (mm)
Argila	0 - 0,002	0 - 0,002
Limo	0,002 - 0,02	0,002 - 0,05
Areia fina	0,02 - 0,2	0,05 - 1
Areia grossa	0,2 - 2	0,1 - 2

Tabela 4.3: Classificação dos diferentes tipos de solo quanto à textura. Adaptado de Kopp [36].

Textura dos Solos	Classes Correspondentes do Diagrama Triangular de Textura
Ligeira C - 0 % a 20 % S - 65 % a 100 %	Arenosa (S) Arenoso-Franco (S.F) Franco-Arenoso (F.S)
Média C - 20 % a 35 % S - 15 % a 65 %	Franco (F) Franco-Limoso (F.L)
Pesada C - 35 % a 100 % S - 0 % a 10 %	Franco-Argiloso (F.C) Argilo-Arenoso (C.S) Argilo-Limoso (C.L) Argiloso (C)

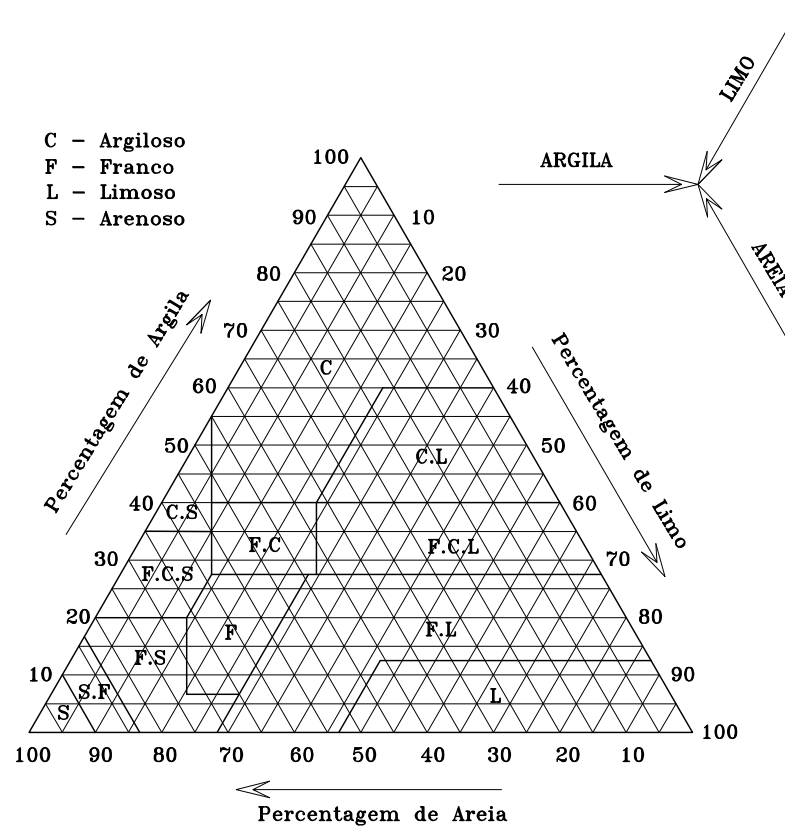


Figura 4.6: Classificação do solo de acordo com o SCS ([36] e [33]).

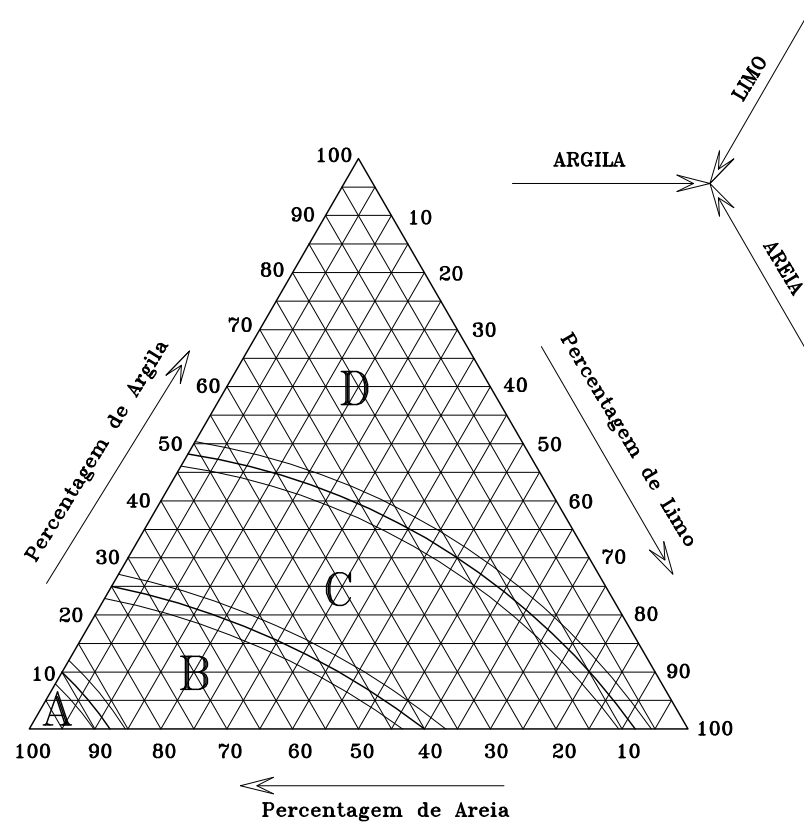


Figura 4.7: Classificação dos diferentes tipos de solo (A,B,C,D).

Capítulo 5

Método de Monte Carlo

Maidment [41] refere que o método de Monte Carlo é uma forma de obter a distribuição da probabilidade de valores de saída de um determinado sistema, a partir dos valores de entrada.

A transformação dos valores de entrada nos de saída, faz-se através de um modelo matemático que representa o comportamento do sistema em estudo [41].

A análise dos valores de saída pode consistir na determinação das variáveis estatísticas básicas, tal como a média, a variância, caixas de bigodes, para observar os resultados numa forma gráfica ou o traçado da curva de distribuição de frequências [41].

A grande dificuldade associada a modelos de poluição difusa passa pela definição das variáveis que determinam o fenómeno.

No caso do arrastamento de poluentes, e de acordo com o modelo exponencial proposto por Wanielista [74], os valores de (c) variam com vários factores, tais como:

- Tipo de poluente.
- Tipo de solo.
- Intensidade pluviométrica.
- Área da bacia hidrográfica.
- Inclinação da bacia hidrográfica.

Os valores de P_0 variam com vários factores, como por exemplo :

- Variação da carga de poluente associada à utilização considerada.
- Cinética de degradação do poluente.
- Tempo desde a última aplicação do poluente, caso este seja de aplicação discreta (*e.g.*: fertilizantes e pesticidas na agricultura), ou acumulação do poluente na superfície desde a última chuvada caso este seja de aplicação contínua (*e.g.*: poluentes associados a tráfego urbano - metais pesados, hidrocarbonetos).
- Capacidade de lavagem do poluente da chuvada anterior.

No caso da Equação Universal da Perda de Solo (USLE), os valores de K , C e P podem sofrer variações significativas, associados a vários factores que, embora tabelados em bibliografia diversa, podem originar erros de compatibilização com a bacia em estudo, tais como :

- Estrutura do solo.
- Cobertura vegetal associada à época do ano considerada.
- Percentagem de matéria orgânica.
- Percentagens de limo, areia, silte e argila.
- Permeabilidade.
- Ocupação da bacia hidrográfica.
- Grau de conservação.

A tarefa de definição das variáveis atrás consideradas pode ser bastante simplificada caso seja possível definir, não apenas um valor, mas um conjunto de valores prováveis.

A metodologia proposta passa pela geração, para cada célula da bacia hidrográfica, de um grande número de dados de entrada associados a uma determinada média e a um desvio padrão. Para cada conjunto de valores gerados (c, P_0) e (K, C, P) vai ser determinada a carga de poluentes e de sedimentos gerados e transportados na bacia hidrográfica, para a pluviosidade considerada.

A geração das variáveis aleatórias está associada a uma determinada distribuição. Novotny [46] refere a U.S.NURP¹ em estudos realizados em áreas urbanas, concluindo que a distribuição que melhor define o comportamento das concentrações dos poluentes de origem difusa é a lognormal.

Este autor defende a boa adaptabilidade da distribuição lognormal para poluentes como sólidos suspensos totais, fósforo total, azoto Kjeldahl, chumbo total e zinco total. Para a carência bioquímica de oxigénio, fósforo solúvel e cobre total a distribuição lognormal apresenta um bom ajustamento.

A distribuição lognormal é caracterizada por ser limitada à esquerda e ilimitada à direita. Esta distribuição é ainda caracterizada pelo facto da distribuição de $\ln(X)$ corresponder uma distribuição Normal ou Gausseana, podendo-se assim utilizar as tabelas desta distribuição para proceder aos cálculos necessários. A distribuição lognormal é uma distribuição que caracteriza muitas das grandezas (naturais ou não) que estão limitadas à esquerda por um valor positivo e ilimitadas à direita (*e.g.*: propriedades de materiais, escoamentos hidrológicos, etc.)

¹ U.S.NURP - *United States National Urban Runoff Protection*

5.1 Leis de distribuição

5.1.1 Lei normal ou Gausseana, $N(\mu, \sigma)$

5.1.1.1 Função distribuição

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_X} \int_{-\infty}^X \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] ds, X \in \mathfrak{R} \quad (5.1)$$

5.1.1.2 Função densidade

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_X} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right], X \in \mathfrak{R} \quad (5.2)$$

5.1.1.3 Moda

$$Mo_X = \mu_X \quad (5.3)$$

5.1.1.4 Mediana

$$Me_X = \mu_X \quad (5.4)$$

5.1.1.5 Média

$$\mu_X \quad (5.5)$$

5.1.1.6 Desvio padrão

$$\sigma_X \quad (5.6)$$

A lei normal é usualmente apresentada em função da variável normal reduzida (σ_Z, μ_Z) , definida pela expressão :

$$Z = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \quad (5.7)$$

5.1.2 Lei lognormal, $LN(\lambda, \xi)$

5.1.2.1 Função distribuição

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \xi} \int_0^X \frac{1}{s} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln s - \lambda}{\xi} \right)^2 \right] ds, X \in \mathfrak{R}^+ \quad (5.8)$$

5.1.2.2 Função densidade

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \xi \cdot X} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln X - \lambda}{\xi} \right)^2 \right], X \in \mathbb{R}^+ \quad (5.9)$$

Caso se pretenda limitar o valor mínimo da distribuição a um valor diferente de zero, X deve ser substituído por $(X - X_{min})$, sendo X_{min} o valor mínimo desejado.

5.1.2.3 Moda

$$Mo_X = \lambda \cdot \exp(-\xi^2) \quad (5.10)$$

5.1.2.4 Mediana

$$Me_X = \lambda \quad (5.11)$$

5.1.2.5 Média

$$\mu_X = \exp \left(\lambda + \frac{1}{2} \xi^2 \right) \quad (5.12)$$

5.1.2.6 Desvio padrão

$$\sigma_X = \mu_X \cdot \sqrt{e^{\xi^2} - 1} \quad (5.13)$$

Tal como foi referido anteriormente, a lei lognormal pode ser obtida a partir da lei normal reduzida efectuando a seguinte transformação :

$$Z = \frac{\ln X - \lambda}{\xi} \quad (5.14)$$

Os parâmetros λ e ξ correspondem à média e ao desvio padrão de $\ln X$:

$$\lambda = \mu_{\ln X} = Me_X \quad (5.15)$$

$$\xi = \sigma_{\ln X} \quad (5.16)$$

5.2 Estabelecimento dos valores do modelo

A distribuição que vai ser utilizada para a definição de todas as variáveis é a lognormal, pelas razões apontadas anteriormente.

Para tal teremos de definir a média e o desvio padrão para cada uma destas variáveis. Este problema pode ser abordado de duas formas, dependendo do tipo de informação disponível :

- Dados de campo.
- Dados bibliográficos.

5.2.1 Dados de campo

Caso a determinação dos valores de entrada do modelo partam de dados de campo, basta determinar a média e o desvio padrão de $\ln(X)$.

Para a situação de desvio padrão da população desconhecido e para um determinado grau de confiança, o intervalo de confiança da amostra obtida em campo, pode ser obtido com a seguinte expressão :

$$\overline{X}_N = \bar{x}_n \pm t_p \cdot \frac{S_{n(n-1)}}{\sqrt{n}} \quad (5.17)$$

Onde,

$\overline{X}_N$ - média da população.

$\bar{x}_n$ - média da amostra.

$S_{n(n-1)}$ - desvio padrão da amostra.

t_p - valor dos percentis da distribuição t de Student associado a um determinado grau de confiança $(1 - \alpha)$ para $(n - 1)$ graus de liberdade.

n - número de elementos da amostra.

Sendo o erro em relação à média associado à amostra, a parcela :

$$Erro = t_p \cdot \frac{S_{n(n-1)}}{\sqrt{n}} \quad (5.18)$$

5.2.2 Dados bibliográficos

Para a definição das grandezas a partir de dados bibliográficos, como é o caso das variáveis associadas à determinação da erosão (USLE), após o reconhecimento do terreno deveremos estabelecer dois valores de referência associados a um determinado percentil e encontrar os valores da média (λ) e desvio padrão (ξ) de $\ln(X)$, através da seguinte expressão:

$$Z = \frac{\ln(X) - \lambda}{\xi} \quad (5.19)$$

Se considerarmos os valores X_1 e X_2 e as variáveis reduzidas Z_1 e Z_2 associadas aos percentis considerados, obtemos assim um sistema de equações. Resolvendo-o, poderemos determinar a média e o desvio padrão do $\ln(X)$ pelas seguintes expressões :

$$\lambda = \ln(X_1) - Z_1 \cdot \xi \quad (5.20)$$

$$\xi = \frac{\ln(X_2) - \ln(X_1)}{Z_2 - Z_1} \quad (5.21)$$

Se considerarmos os percentis 50 e 90, os valores de Z_1 e Z_2 são respectivamente 0 e 1,282 (variáveis reduzidas da distribuição normal), e as expressões assumem a seguinte configuração :

$$\lambda = \ln(X_1) \quad (5.22)$$

$$\xi = \frac{\ln(X_2) - \ln(X_1)}{1,282} \quad (5.23)$$

Capítulo 6

Proposta de um modelo

Neste capítulo vai ser apresentada a metodologia na qual se baseia o programa desenvolvido e cujo código em fortran 90 está apresentado no apêndice (J) (pag. 158). Pretende-se também discutir desenvolvimentos futuros que permitam melhorar ou aumentar a capacidade de previsão do modelo apresentado.

6.1 Escoamento

Inicialmente foi utilizada uma modelação do escoamento distribuído de acordo com o modelo de onda cinemática. Esse modelo foi desenvolvido com base na metodologia apresentada no apêndice (G) (pag. 133) e serviu para testar o modelo físico de geração de poluentes apresentado por Parr [48], apêndice (E) (pag. 127). O código das respectivas rotinas pode ser analisado no apêndice (J.18) (pag. 219). Devido ao abandono deste modelo e de ter sido adoptado o modelo exponencial, não é essencial a informação associada a hidrogramas (*e.g.* velocidade e/ou altura máxima do escoamento, velocidades em função do tempo.), porque basta-nos conhecer o excesso hídrico por célula. A utilização de um modelo que determine os hidrogramas de escoamento por célula torna o processo de cálculo mais pesado do ponto de vista computacional.

Face ao exposto alterou-se o código do programa para determinar apenas os volumes escoados através do balanço de massas associado ao excesso hídrico obtido pelo método de *Soil Conservation Service* em cada célula da bacia hidrográfica ¹.

A presente abordagem responde de igual forma ao problema com um tempo de cálculo inferior. Chegou-se aos mesmos resultados através da aplicação dos dois métodos.

Na passagem de um modelo para outro (hidrogramas *vs* volume escoado), perde-se a possibilidade de obter polutogramas², *i.e.*, apenas se conseguem obter as massas totais de poluentes lixiviados.

Caso em desenvolvimentos futuros se pretenda utilizar variáveis que sejam função dos caudais escoados ao longo do fenómeno hidrológico, como por exemplo, substituir o método de Roehl por uma metodologia de natureza mais física, como a apresentada no capítulo (F) (pag. 130) onde a geração e transporte de sedimentos depende de um hidrograma, o modelo de onda cinemática responde perfeitamente ao problema.

¹Para a transformação do modelo para um escoamento em função do tempo (onda cinemática), basta substituir o ficheiro escoamento.f90 pelos ficheiros hidrocinematica.f90 e caudal.f90, com alguns ajustes.

²Polutogramas traduzem a variação do transporte do poluente ao longo do fenómeno hidrológico.

A chuva efectiva no modelo de poluição difusa foi determinada da seguinte forma :

Após a definição por célula, do tipo de solo (A, B, C ou D) e do tipo de cobertura, obtemos os valores de CN tabelados.

Estes valores, tabelados para a condição de humidade do solo em capacidade de campo (AMCII), deverão ser transformados para AMCI ou AMCIII se as condições anteriores de humidade do solo assim o exigirem.

Após a definição de CN passa-se para a quantificação da chuva efectiva (escoamento).

$$(I_a)_i = \frac{(S_f)_i}{\frac{r}{K_i} - 1} \quad (6.1)$$

Onde,

$(I_a)_i$ - abstracção inicial da célula (i), *mm*.

$(S_f)_i$ - factor de sucção na célula (i).

r - intensidade de precipitação suposta constante, $\frac{mm}{h}$.

K_i - condutividade saturada do solo na célula (i), $\frac{mm}{h}$.

$$(S_f)_i = \frac{(S_p)_i^2}{2 \cdot K_i} \quad (6.2)$$

Onde,

$(S_f)_i$ - factor de sucção na célula (i).

$(S_p)_i$ - sorptividade do solo na célula (i), $\frac{mm}{h^{\frac{1}{2}}}$.

K_i - condutividade saturada do solo na célula (i), $\frac{mm}{h}$.

A condutividade saturada do solo em cada célula é obtida pelas equações (4.17) a (4.19).

A sorptividade do solo em cada célula é determinada pelas equações (4.20) e (4.21).

$$Q_i^j = \frac{(P_i^j - (I_a)_i)^2}{P_i^j - (I_a)_i + S_i} \quad (6.3)$$

Onde,

Q_i^j - chuva efectiva na célula (i), *mm*.

P_i^j - precipitação na célula (i), *mm*.

$(I_a)_i$ - abstracção inicial da célula (i), *mm*.

S_i - infiltração potencial na célula (i), *mm*.

CN_i - número de escoamento da célula (i).

$$S_i = \frac{25400}{CN_i} - 254 \quad (6.4)$$

Onde,

S_i - infiltração potencial na célula (i), *mm*.

CN_i - número de escoamento da célula (i).

6.2 Geração e transporte de poluentes

A forma como a informação está distribuída pela bacia hidrográfica foi discutida no capítulo (4)(pag. 57). Resumindo, podemos dizer que a bacia hidrográfica está dividida em

células com características homogêneas e que o escoamento dentro da bacia hidrográfica faz-se entre duas células contíguas de maior declividade de terreno.

A formulação utilizada no transporte de poluentes é a apresentada no capítulo (3)(pag. 27) e adaptada ao modelo da seguinte forma :

- Cada célula tem um valor de c .
- A massa de poluente que é libertada em cada célula é função do excesso hídrico gerado na própria célula, capítulo (4)(pag. 57).
- O modelo permite analisar a fracção do poluente disponível para ser arrastado pelo escoamento em cada célula e a qualidade da água em qualquer ponto da bacia hidrográfica.

A formulação para a resolução do problema é a seguinte :

$$(P_e)_i = \sum_{j=1}^n (P_a)_i^j + (P_0)_i \cdot (1 - e^{-C_i \cdot R_i}) \quad (6.5)$$

Onde,

$(P_e)_i$ - massa de poluente que sai da célula (i), kg .

$(P_a)_i^j$ - massa de poluente que entra na célula (i) de células afluentes ($j=1...n$), kg .

$(P_0)_i$ - massa de poluente inicial disponível para ser arrastada na célula (i), kg .

c_i - coeficiente de arrastamento de poluentes da célula (i), $\frac{1}{mm}$.

R_i - excesso hídrico gerado na célula (i), mm .

n - número de células afluentes.

A concentração média de poluente que sai da sub-bacia(i) é dada por :

$$C_i = \frac{(P_e)_i}{\forall_i} \cdot [10^{-3} \frac{kg}{g}] \quad (6.6)$$

Onde,

C_i - concentração média de poluentes que sai da sub-bacia(i), $\frac{g}{m^3}$.

$(P_e)_i$ - massa de poluente que sai da sub-bacia(i), kg .

$\forall_i$ - volume escoado na secção de referência da sub-bacia(i), m^3 .

6.2.1 Zonas rurais - desenvolvimentos futuros

No modelo desenvolvido não foi considerada a relação dos poluentes com os sedimentos. Será de considerar em desenvolvimentos futuros que o modelo exponencial funcione para a determinação de substâncias dissolvidas, e considerar a massa de poluente que é transportada com os sedimentos. A relação do poluente com os sedimentos varia com as características destes.

A metodologia proposta para a quantificação dos poluentes associados a sedimentos é apresentada no capítulo (3) (pag. 27).

Deverá ser considerada em modelos futuros a formulação desenvolvida neste trabalho para a determinação de (P_0) em zonas permeáveis, secção (3.2.2)(pag. 35)

Foi considerado que o escoamento gerado na bacia formada pela célula em estudo é uniforme em toda a sua largura. Para situação de células em zonas rurais, a libertação de poluentes deverá ser dividida em diferentes zonas :

- Escoamento na linha de água principal da célula. Nesta linha de água escoo o caudal proveniente das células de montante adicionado ao gerado na própria célula.
- Escoamento em linha de água devido ao escoamento gerado na própria célula. As linhas de água referidas são geradas pelos escoamentos preferenciais na célula em estudo. Este caudal escoo para a linha de água principal.
- Escoamento difuso na célula devido ao caudal gerado na célula. Escoamento uniformemente distribuído pela superfície da célula. Este caudal escoo para as linhas de água referidas no ponto anterior.

A libertação de poluentes nas áreas de influência de cada uma das zonas referidas no ponto anterior é proporcional ao excesso hídrico que por elas passa de acordo com o modelo exponencial.

Esta diferenciação permite modelar a libertação de poluentes de uma forma mais real, uma vez que existem numa mesma célula diferentes intensidades de escoamento, que provocam diferentes intensidades de libertação de poluentes. A determinação do poluente deverá ser obtida pela ponderação dos diferentes escoamentos.

Gilley *et al. in* WEPP [76] apresenta uma formulação que permite determinar a largura das linhas de água geradas na própria célula.

$$b = 1,13Q_e^{0,303} \quad (6.7)$$

Onde,

b - largura das linhas de água, m .

Q_e - caudal, $\frac{m^3}{s}$.

Gilley *et al. in* WEPP [76] aponta que a densidade média das linhas de água obtidas em 11 bacias hidrográficas é da ordem de $(1 \frac{um}{m})$.

6.2.2 Zonas urbanas - desenvolvimentos futuros

A metodologia atrás apresentada não pode ser aplicada nas zonas urbanas devido às características da cobertura do solo o qual não permite a formação de linhas de água preferenciais com uma determinada densidade de drenagem pelo facto de estarmos na presença de uma superfície impermeável. Face ao exposto poderá aqui ser considerado um escoamento uniformemente distribuído pela célula.

Na situação do estudo da libertação de poluentes em zonas urbanas deverá ser considerada a minimização do excesso hídrico provocado pela existência de sumidouros e sargetas.

A forma possível de resolver este problema passa por considerar um poço em cada célula, não existindo escoamento de montante, apenas o gerado na própria célula. Todo o volume gerado é escoado pelo poço existente no centro, figura (6.1) (pag. 78).

Para simular o colector de saída dos pluviais da zona urbana integrada na bacia hidrográfica

em estudo, pode estar associada a um ou mais poços, uma fonte em qualquer célula a jusante, a qual representa um ponto de poluição e caudal pontual. A ideia apresentada encontra-se esquematizada na figura (6.1) (pag. 78).

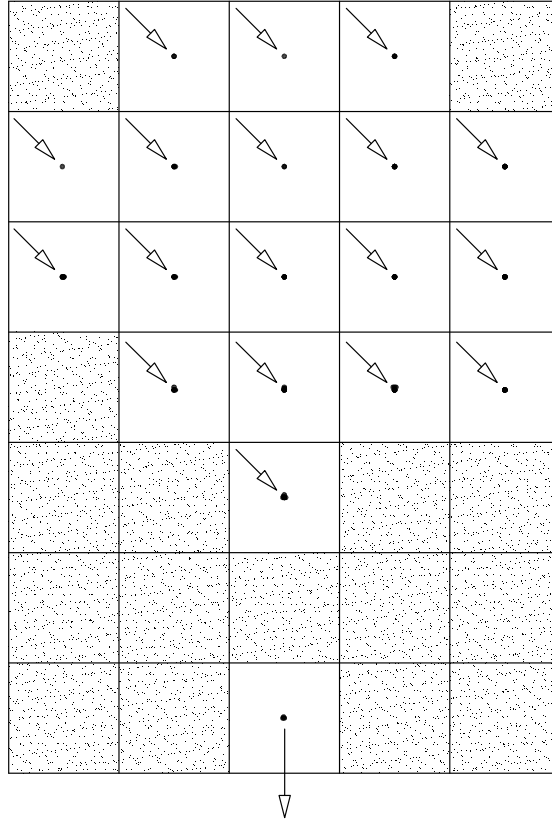


Figura 6.1: Esquema da drenagem em zona urbana com rede pluvial, com poços e uma fonte.

6.3 Erosão

Para a aplicação da *USLE* no modelo foram adoptados os seguintes critérios :

- Cada célula tem as suas propriedades. Relativamente a (K) , (C) e (P) , estes são ponderados em cada sub-bacia(i).
- O factor de energia da chuva (R) é constante em toda a bacia hidrográfica, porque considerou uma intensidade de precipitação constante em toda a bacia hidrográfica.
- Os parâmetros (L) e (S) são definidos relativamente ao comprimento da maior linha de água principal da sub-bacia(i) relativa a cada célula.

Na aplicação da *USLE* ao modelo de poluição difusa foi considerada a seguinte formulação:

$$A_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i \quad (6.8)$$

Onde,

A_i - erosão na sub-bacia (i), $\frac{t}{ha}$.

- R_i - factor de erosividade da precipitação, $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}$.
 K_i - factor de erodibilidade do solo da sub-bacia(i), $\frac{t}{ha} \cdot \frac{ha \cdot h}{MJ \cdot mm}$.
 LS_i - factor fisiográfico da sub-bacia(i).
 C_i - factor de técnica de cultivo da sub-bacia(i).
 P_i - factor de prática de conservação da sub-bacia(i).

6.3.1 Índice de erosividade da chuva - R

A erosividade associada à precipitação é constante em toda a bacia hidrográfica, porque foi considerado que chovia uniformemente em toda a referida bacia. Em bacias de média e grande dimensão esta abordagem não é válida, porque as primeiras chuvas após o Verão (as mais gravosas do ponto de vista de transporte de lixiviados) são geralmente localizadas no espaço, ao contrário das chuvas de Inverno que ocupam vastas áreas.

6.3.2 Factor de erodibilidade do solo - K

Para a determinação do factor de erodibilidade do solo foi considerada a média ponderada dos factores de cada uma das sub-bacias consideradas. Como a área das células é constante podemos apresentar o factor de erodibilidade para a sub-bacia formada pela célula (i) por :

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^n K_i^j}{n} \quad (6.9)$$

Onde,

- K_i - factor de erodibilidade do solo da sub-bacia(i).
 K_i^j - factor de erodibilidade da célula (j) da sub-bacia(i).
 n - número de células pela qual é formada a sub-bacia(i).

6.3.3 Factor fisiográfico - LS

Para a determinação do factor fisiográfico da sub-bacia hidrográfica (i), foi considerada a linha de água principal de cada uma destas. O critério de escolha da linha de água principal é a que corresponde ao maior comprimento dentro da sub-bacia hidrográfica considerada.

$$LS_i = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_j \cdot S_j}{\lambda_i} \quad (6.10)$$

Onde,

- δ_j - parâmetro de correcção.
 S_j - factor de declive relativo ao troço (j).
 λ_i - comprimento da linha de água principal da sub-bacia(i)³, m.

$$\delta_j = \frac{\lambda_j^{(m_j+1)} - \lambda_{(j-1)}^{(m_{(j-1)}+1)}}{22,1^{m_j}} \quad (6.11)$$

Onde,

- $\lambda_{(j-1)}$ - comprimento da linha de água principal da sub-bacia(i)⁴, m.
 λ_j - comprimento da linha de água principal da sub-bacia(i)⁵, m.
 $m_{(j-1)}$ - parâmetro (m) do troço (j-1).
 m_j - parâmetro (m) do troço (j).

³A contar desde o topo da encosta até à extremidade jusante do último troço (secção de referência da sub-bacia(i)).

⁴A contar do topo da encosta até extremidade jusante do troço (j-1).

⁵A contar do topo da encosta até extremidade jusante do troço (j).

6.3.4 Factor de técnica cultural - C

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_i^j}{n} \quad (6.12)$$

Onde,

C_i - factor de técnica de cultura da sub-bacia(i).

C_i^j - factor de técnica de cultura da célula(j) da sub-bacia(i).

n - número de células pela qual é formada a sub-bacia(i).

6.3.5 Factor de prática de conservação - P

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n P_i^j}{n} \quad (6.13)$$

Onde,

P_i - factor de prática de conservação da sub-bacia(i).

P_i^j - factor de prática de conservação da célula (j) da sub-bacia(i).

n - número de células pela qual é formada a sub-bacia(i).

6.4 Transporte de sedimentos

Para a determinação do transporte de sedimentos foi aplicado o método de Roehl e utilizou-se a seguinte metodologia :

- Para cada sub-bacia(i) é determinado o coeficiente de produção de sedimentos de Roehl.
- A massa de sedimentos que sai em cada sub-bacia é determinada pela massa de sedimentos erodidos (obtidos pela USLE) multiplicado pelo coeficiente de produção de sedimentos.

A determinação da parcela de sedimentos erodidos que são transportados para o exterior da bacia hidrográfica foi integrada no modelo de poluição difusa da seguinte forma :

$$(A_p)_i = \frac{(C_{ps})_i \cdot A_i}{100} \quad (6.14)$$

Onde,

$(A_p)_i$ - quantidade de sedimentos produzidos na sub-bacia(i), $\frac{t}{ha}$.

A_i - quantidade de sedimentos erodidos (USLE) na sub-bacia(i), $\frac{t}{ha}$.

$(C_{ps})_i$ - coeficiente de produção de sedimentos da sub-bacia(i), %.

A determinação de $(C_{ps})_i$ foi obtida por :

$$(C_{ps})_i = 10^{[1,714 - 0,339 \cdot \log(A_b)_i]} \quad (6.15)$$

Onde,

$(A_b)_i$ - área da sub-bacia(i), km^2 .

$(C_{ps})_i$ - coeficiente de produção de sedimentos da sub-bacia(i), %.

Embora esta metodologia seja de fácil aplicação e indicada por diversos autores como adequada [46, 11], a sua aplicação a uma chuvaada pode dar valores pouco correctos, porque

é apenas função da área da bacia hidrográfica, *i.e.*, é insensível ao fenómeno hidrológico. Podemos assim, ter concentrações de sedimentos na água muito superiores às capacidades de transporte aquando de baixo escoamento. A ligação do transporte de poluentes associados aos sedimentos implica a determinação do sedimentos transportados com algum rigor.

Face ao exposto, sugere-se em desenvolvimentos futuros substituir a metodologia de Roehl pela de Hjelmfelt [32], apresentada no apêndice (F) (pag. 130). A sua aplicação implica a utilização do modelo de escoamento de onda cinemática, apêndice (G) (pag. 133), ou outro que permita estimar o hidrograma de escoamento associado a um determinado hietograma.

6.5 Monte Carlo

No modelo proposto, o método de Monte Carlo foi aplicado às variáveis (c) e (P_0) do modelo exponencial e a (K) , (C) e (P) da USLE, de acordo com o apresentado no capítulo (5) (pag. 69).

6.6 Desenvolvimentos futuros no modelo

Pretende-se como desenvolvimentos futuros, integrar as formulações aqui apresentadas num modelo contínuo de gestão global de poluentes na bacia hidrográfica. Nesse modelo irá integrar-se a poluição difusa de origem urbana e agrícola, com a poluição pontual devida a populações e indústrias.

Pretende-se assim desenvolver uma ferramenta de planeamento ou de modelação da qualidade da água (os dados extraídos do modelo podem ser tratados por outros, *e.g.*, QUAL2E).

Mais alguns pontos deverão ser considerados :

- Relacionar a perda de poluente ao longo do fenómeno hidrológico devido à deposição de sedimentos.
- Integrar a poluição difusa com a poluição pontual.
- Desenvolver um modelo contínuo como uma sobreposição de fenómenos discretos e contínuos, por forma a este fazer uma análise contínua do ano hidrológico :
 - Fenómenos Discretos :
 - * Pluviosidade.
 - * Práticas de adubação agrícola.
 - * Práticas de aplicação de pesticidas.
 - Fenómenos Contínuos :
 - * Deposição de poluentes nas zonas urbanas.
 - * Evapotranspiração.
 - * Descargas de poluentes devido à população. Este ponto pode estar associado a uma curva de sazonalidade.
 - * Descargas de poluentes devido a indústrias. Podem ser consideradas variações ao longo do ano, caso a indústria esteja associada a razões de sazonalidade.

- Permitir a introdução de equipamentos que simulem a diminuição da carga de poluentes no meio, *e.g.*, ETAR's, lagoas de sedimentação, etc..
- Integrar todos os modelos numa ferramenta SIG que permita a fácil introdução, visualização e tratamento de dados e resultados.
- Diferenciar entre escoamento em linha de água e escoamento difuso na bacia. Numa bacia, o escoamento faz-se preferencialmente por linha de água sendo os troços em escoamento difuso pequenos.
- Permitir apertar a malha das células em zonas onde haja grande variabilidade geográfica da informação e alargá-la onde esta não seja tão grande.
- Modelar a distribuição espacial e temporal dos parâmetros meteorológicos na bacia em função dos dados das estações meteorológicas, *e.g.*, a intensidade de precipitação num dado momento e numa determinada célula é função da distância desta à estação. Quanto mais próxima da célula estiver uma estação, maior será a sua influência relativamente ao comportamento hidrológico naquele ponto da bacia. Outra abordagem possível é a utilização da metodologia dos polígonos de Thiessen.

Capítulo 7

Calibração do modelo

Neste capítulo vamos fazer referência a uma proposta de metodologia que permita a calibração do modelo, face às suas características e ocupações por forma a que este possa ser extrapolável para qualquer bacia.

O objectivo desta metodologia é a obtenção de valores bibliográficos de referência para se poder aplicar o modelo a outras bacias sem a necessidade de grande instrumentação.

A realização deste trabalho é indispensável para a aplicabilidade deste modelo.

7.1 Obtenção dos dados

7.1.1 Durante o fenómeno hidrológico

A metodologia proposta para a obtenção de dados na bacia ao longo do fenómeno hidrológico, tem por base a determinação das variáveis do modelo apresentada por Millar [42], onde é necessária a recolha de dados ao longo do fenómeno hidrológico, figura (3.1) (pag. 34).

- Escolha da bacia hidrográfica - para a definição da zona para recolha de dados deveremos escolher zonas homogéneas perfeitamente identificáveis e caracterizáveis (*e.g.*: pinhal, pomar de citrinos, zona urbana comercial, zona urbana residencial). Para que o trabalho realizado em diversas bacias hidrográficas possa ser compilado e integrado, deve ser realizada uma classificação geral e coerente da ocupação do solo. Como proposta inicial, podemos considerar a apresentada em Pimenta [49] relativamente aos factores de técnica cultural, apêndice (C) (pag. 119).
- Colheita de amostras - as amostras devem ser colhidas com um amostrador automático, que permita a obtenção da evolução dos poluentes ao longo do fenómeno meteorológico (quatro a seis amostragens ao longo do fenómeno).
- Precipitação - deverá ser conhecido não só o volume total de precipitação como o próprio hietograma associado, para que o possamos posteriormente correlacionar com o fenómeno de erosão e escoamento. Estes dados podem ser obtidos por instalação de um hidrógrafo no local de amostragem, ou correlacionar com estações meteorológicas que influenciem o local. Deverá também ser feita a análise da água da chuva relativamente aos poluentes em estudos, para permitir estimar qual a contribuição desta na poluição total.
- Escoamento - deverá ser conhecido o excesso hídrico ao longo do fenómeno meteorológico. Podemos obter estes valores através da instalação de um descarregador

(*e.g.*: Descarregador triangular, Calha Parshall) equipado com um medidor de caudal ultra-sónico.

- Amostra - o volume de amostra deve ser suficiente para se poder realizar as determinações necessárias em laboratório. Face à relação dos poluentes com os sedimentos (eles próprios poluentes) deverão ser sempre determinadas concentrações destes na amostra e a sua relação com o(s) poluente(s) em estudo.

A medição da escurência de poluentes deverá ser realizada diversas vezes para haver representatividade estatística.

7.1.2 Antes e depois do fenómeno hidrológico

Para uma caracterização completa do fenómeno não basta recolher dados ao longo do fenómeno meteorológico. Tem de ser feito um trabalho contínuo de recolha de dados durante o período em que decorre a campanha para melhor se perceber os valores que se obtêm aquando de uma chuvada. Posto isto, propomos a seguinte abordagem :

- Zonas Urbanas
 - Caracterização da ocupação e actividades desenvolvidas no local.
 - Densidade urbanizada.
 - Intensidade de tráfego.
 - Percentagem de zona impermeável.
 - Determinação dos valores de CN na bacia hidrográfica¹.
 - Verificação da periodicidade de limpeza de ruas e o volume de sedimentos retirado de cada vez. Permitindo assim, determinar a taxa de deposição de sedimentos nas ruas.
 - Determinação da concentração do(s) poluente(s) nos sedimentos da rua.
 - Verificação da existência de obras que permitam a minimização do escoamento superficial ou a retenção de águas pluviais.
- Zonas Rurais
 - Análise granulométrica do horizonte A (percentagens de argila, areia e limo).
 - Determinação do teor de matéria orgânica do horizonte A.
 - Classificação do solo quanto ao tipo (A, B, C e D), figura (4.7) (pag. 68).
 - Determinação da concentração de(s) poluente(s) no horizonte A.
 - Classificação da zona em termos de ocupação rural (*e.g.*: Pomar de citrinos, floresta, culturas arvenses de sequeiro, etc.).
 - Caracterização da bacia em termos (K), (C) e (P) da Equação Universal da Perda de Solo.
 - Verificação da periodicidade e dosagens associadas à aplicação do(s) poluente(s) em estudo.
 - Caracterização da topografia da bacia hidrográfica.

¹CN - Número de escoamento.

7.2 Tratamento dos dados

Na fase de tratamento dos dados, deverão ser contemplados os seguintes passos.

- Verificar a distribuição mais ajustada aos dados disponíveis. Verificar se a lognormal é a mais ajustada.
- Determinar os valores de (c) e (P_0) do modelo exponencial.
- Correlacionar, nas zonas permeáveis $(P_0)^2$ com $(X_0)^3$ e determinar $(k)^4$ de acordo com a formulação proposta.
- Determinar a média e desvio padrão associado às variáveis que vão ser utilizadas no método de Monte Carlo.

7.3 Análise dos resultados

Deverá ser também estudada a gama de dimensões que as bacias monitorizadas deverão ter para que sejam representativas do modelo.

Deverá ainda ser estudada a relação desta com bacias de pequena, média e grande dimensão. Esta verificação passa por fazer o modelo correr nessas bacias e comparar os valores obtidos com os valores reais, colhidos na secção de referência da bacia.

Este trabalho contribuirá para a melhoria do desempenho do modelo através de ajustes à formulação de base.

² P_0 - Massa inicial de poluente disponível para ser arrastado

³ X_0 - Concentração do poluente nos sedimentos

⁴ k - Factor de migração do poluente para a superfície

Capítulo 8

Ribeira da Meia Léguas

8.1 Caracterização da bacia hidrográfica

O modelo de poluição difusa é aplicado à bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas, situada entre Faro e Olhão.

Corresponde a uma bacia costeira de desagua directamente na Ria Formosa com uma área de $8,45 \text{ km}^2$ e a linha de água principal tem 7,1 km de comprimento. Tem uma altitude máxima de 102 m e mínima de 0 m na foz.

É uma ribeira de caudal intermitente, apresentando apenas escoamento após chuvas contínuas.

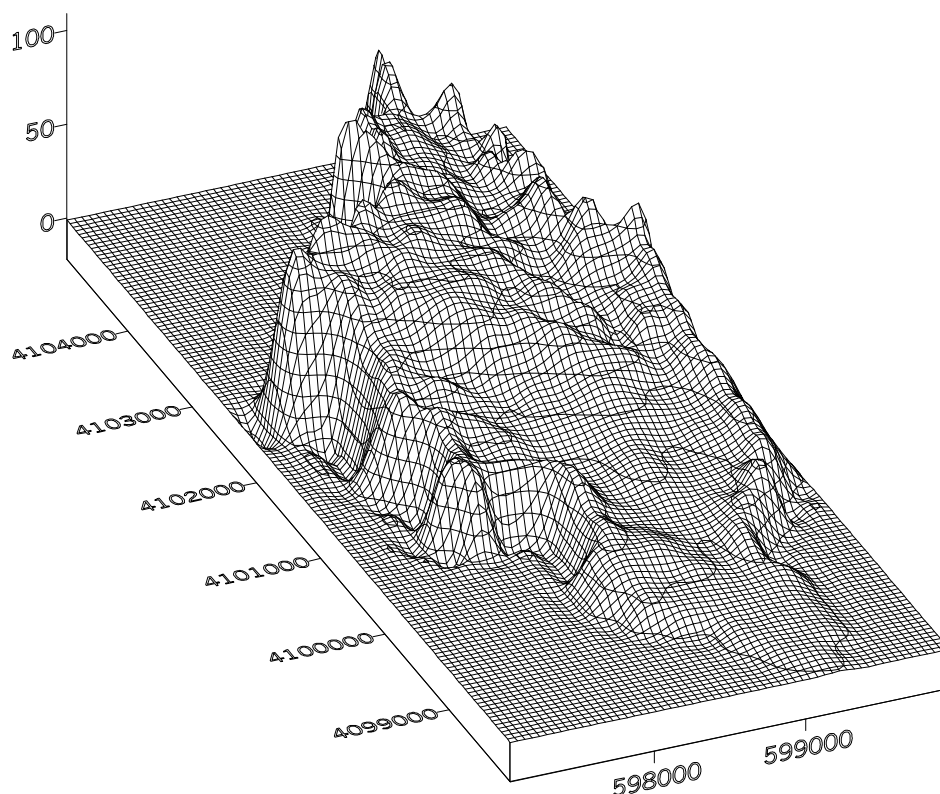


Figura 8.1: Representação tridimensional da bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas.

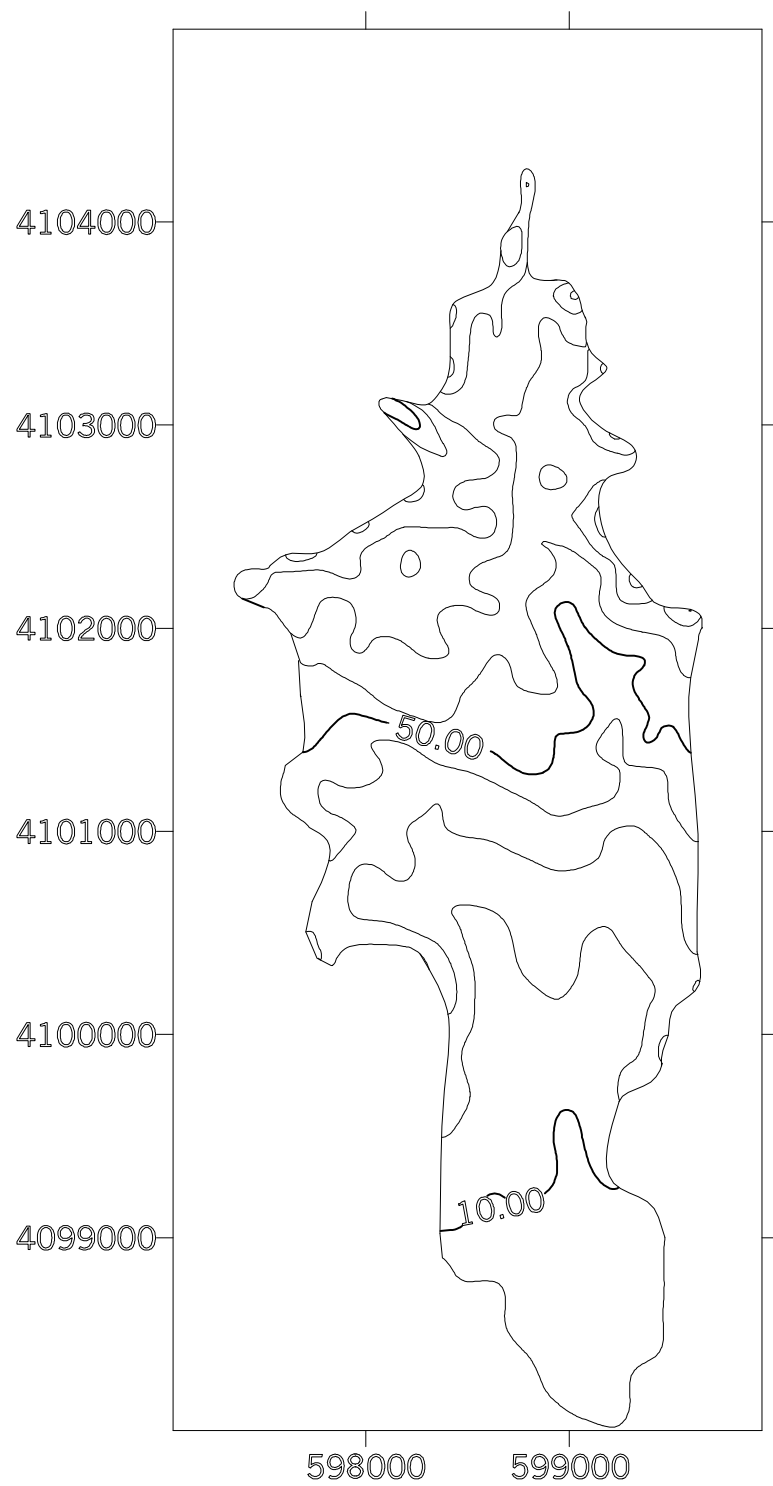


Figura 8.2: Planta da bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas.

Tabela 8.1: Característica e ocupação da bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas

Classe	Ocupação	Solo	Classificação SCS	CN	NT (%)	Área (ha)	Ocupação (%)
1	Sapal	Ass	D	89	0,15	18	2,1
2	Culturas Arvenses de Sequeiro	Ass	D	89	0,15	5	0,6
3	Culturas Arvenses de Sequeiro	Vcd	D	89	0,20	11	1,3
4	Culturas Arvenses de Sequeiro	Pc	C	85	0,15	13	1,5
5	Culturas Arvenses de Sequeiro	Aac	D	89	0,10	16	1,9
6	Culturas Arvenses de Regadio	Rgc	A	67	0,20	18	2,1
7	Culturas Arvenses de Regadio	Aac	D	89	0,20	119	14,1
8	Culturas Arvenses de Regadio	Vt	A	67	0,20	39	4,6
9	Culturas Arvenses de Regadio + Pomar	Aac	D	89	0,20	1	0,1
10	Arvoredo Frutífero Misto	Aac	D	91	0,15	4	0,5
11	Arvoredo Frutífero Misto	Vt	A	72	0,15	2	0,2
12	Arvoredo Frutífero Misto	Rgc	A	72	0,15	5	0,6
13	Vinha	Vt	A	72	0,05	13	1,5
14	Amendoal	Vt + Et	A	72	0,05	1	0,1
15	Amendoal	Vc	C	88	0,15	428	50,7
16	Amendoal	Vt	A	72	0,05	20	2,4
17	Amendoal + Figueiral	Vt + Et	A	72	0,05	15	1,8
18	Alfarrobeiral	Vc	C	88	0,15	32	3,8
19	Figueiral	Pc	C	88	0,15	20	2,4
20	Pinhal	Rg	A	45	0,05	24	2,8
21	Pinhal Bravo + Vinha	Vt + Et	A	45	0,05	31	3,7
22	Prado ou Pastagens	Pc	C	84	0,15	10	1,2
						845	100

8.2 Recolha de dados

Para a definição dos dados de entrada para a bacia hidrográfica considerou-se a seguinte metodologia :

- A secção de vazão tem as coordenadas UTM 29SNA993980.
- A bacia hidrográfica foi inscrita num rectângulo de 30 por 70 células de um hectare de área.
- A definição da topografia (cotas dos centros de gravidade das células) foi feita a partir de cartas militares, à escala 1:25000 (cartas militares n^{os}: 607 e 611) [8]. Na figura (8.1) (pag. 86) podemos ver uma representação em três dimensões da bacia hidrográfica em estudo. Na figura (8.2) (pag. 87) encontra-se representada uma planta da bacia com as respectivas curvas de nível. As figuras foram desenhadas com base no levantamento feito a partir das cartas militares anteriormente referidas.
- A definição das ocupações na bacia hidrográfica foi feita a partir da Carta Agrícola e Florestal de Portugal [6], à escala 1:25000 (cartas n^{os}: 607 e 611)
- A definição dos tipos de solos foi elaborada a partir da Carta de Solos de Portugal [7], à escala 1:50 000 (carta n^o 53-A) e das publicações de Cardoso [12] e Kopp [36]. De acordo com a classificação adoptada pelo Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário (S.R.O.A.), os tipos de solos que constituem a bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas, são :
 - Aac - aluviosolos modernos calcários.
 - Ass - solos salinos de salinidade elevada de aluviões de textura mediana.
 - Pc - solos calcários pardos de calcários não compactos.
 - Rg - regossolos psamíticos não húmidos.
 - Rgc - regossolos psamíticos não húmidos cultivados.

- Vc - solos calcários vermelhos de climas mediterrânicos de calcários.
 - Vcd - solos mediterrâneos vermelhos ou amarelos de calcários compactos ou dolomias.
 - Vt - solos litólitos não húmicos de arenitos.
 - Vt + Et - solos litólitos não húmicos de arenitos (Vt) com litossolos esqueléticos de arenitos (Et).
- A partir de Cardoso [12] e Kopp [36] foram obtidos valores típicos de amostras de solo (fracções de areia, limo, argila e matéria orgânica) para os diversos solos existentes na bacia hidrográfica. Para efeitos deste exercício foi admitido que os valores apresentados por estes autores coincidem com os existentes no local. Esses valores estão apresentados no apêndice (H) (pag. 137).
 - Os coeficientes de erodibilidade do solo (K) da USLE, foram determinados a partir dos dados referidos no ponto anterior e com a expressão (3.60). Os resultados estão apresentados no apêndice (H) (pag. 137).
 - Os factores de cultura do solo (C) da USLE foram obtidos a partir dos valores referidos no apêndice (C) (pag. 119).
 - Os factores de Prática de Conservação do Solo (P) da USLE foram estimados a partir do quadro (C.13) (pag. 123).
 - Os tipos de solo, de acordo com o *Soil Conservation Service* (A, B, C e D), foram determinados a partir das diferentes fracções do solo, apêndice (H) (pag. 137) e do gráfico (4.6) (pag. 67). Os resultados estão apresentados no apêndice (H) (pag. 137).
 - O números de escoamento (CN) foram determinados a partir das diferentes fracções dos quadros do *Soil Conservation Service* apresentadas no apêndice (D) (pag. 124), de acordo com as ocupações previstas e os tipos de solo obtidos no ponto anterior.
 - Os parâmetros relativos ao modelo exponencial foram calibrados de acordo com os dados referidos nos quadros (A.6) (pag. 113) e (A.12) (pag. 114), relativos respectivamente, às concentrações médias de poluentes e às cargas anuais de poluentes. A partir destes valores fixou-se (P_0) e (c).
 - O poluente considerado foi o azoto total. Considerando que as três principais formas de azoto são a orgânica, amoniacal e nítrica, o Código de Boas Práticas Agrícolas [43] refere que :
 - Nitratos - são sais extremamente solúveis em água e o ião nitrato não é susceptível de ser retido em quantidade apreciável pelo complexo de adsorção do solo (argila e húmus) e não reage com outros constituintes para dar origem a compostos insolúveis ou de solubilidade mais ou menos reduzida. Este ião tem grande mobilidade e facilmente é arrastado para os lençóis freáticos ou para as linhas de água.
 - Azoto Amoniacal - este ião é facilmente retido pelo complexo de adsorção do solo e não fica tão facilmente sujeito às perdas por lixiviação.
 - Azoto Orgânico - esta forma complexa de azoto é fortemente retida pelo solo e não se perde nas águas de lixiviação.

Gros [31] refere que o azoto total do solo compreende o azoto orgânico e mineral. Este último representa somente 4 % a 5 % do total, podendo-se identificar o azoto orgânico com o total de um solo. De acordo com diversos autores [31, 61, 72], a relação $\frac{C}{N}$ no solo é cerca de 20. Esta relação encontrada nas referências bibliográficas relativas aos solos foi a utilizada na simulação da ribeira da Meia Léguas [12, 36]. Os valores encontrados só devem ser considerados a título de exemplo, não tendo sido sujeitos a qualquer calibração. Refira-se ainda que não foram encontrados valores bibliográficos de referência para as ocupações existentes.

Os valores de (P_0) tiveram em consideração as concentrações (X_0) e calibrou-se (k) e (c) por forma a respeitar os valores referentes no ponto anterior.

- Para efeitos de demonstração da metodologia, o desvio padrão associado a (K) , (C) e (P) da USLE e a (P_0) e (c) do modelo exponencial de transporte de poluentes, foi admitido que o percentil 90 correspondia a 125 % do percentil 50.
- Os valores dos percentis 50 foram os dados bibliográficos referidos nos pontos anteriores.
- No final sobrepôs-se toda a informação e criaram-se classes de ocupação do solo, tendo sido encontradas 22 classes. Na figura (8.3) (pag. 91) estão representadas as classes de ocupação do solo na bacia hidrográfica.

No quadro (8.1) (pag. 88) podemos observar um resumo dos dados que constituem a bacia hidrográfica. Como nota final, é de referir que embora houvesse cuidado na escolha dos valores de entrada do modelo, estes devem ser considerados como meramente indicativos da metodologia proposta, devido à falta de dados de campo.

8.3 Definição do hietograma

Para dar início ao funcionamento do modelo temos de definir o fenómeno hidrológico que vai gerar os valores relativos ao escoamento, geração e transporte de sedimentos e poluentes.

Para o estudo foi decidido analisar chuvas de intensidade crescente com a duração de uma hora. Para tal gerou-se um hietograma unitário para uma precipitação de uma hora para assim se poder gerar qualquer chuva para esta duração. Foram estudadas 10 chuvas entre cinco a 50 milímetros, desfasadas de cinco milímetros.

Para a definição do hietograma foi aplicada a metodologia proposta por Chow [15] e para tal foram utilizadas as expressões IDF ¹ [24].

$$I = a \cdot t^b \quad (8.1)$$

Onde,

I - intensidade de precipitação, $\frac{mm}{h}$.

t - tempo, min .

a, b - constantes que dependem do período de retorno.

¹IDF - Intensidade-Duração-Frequência

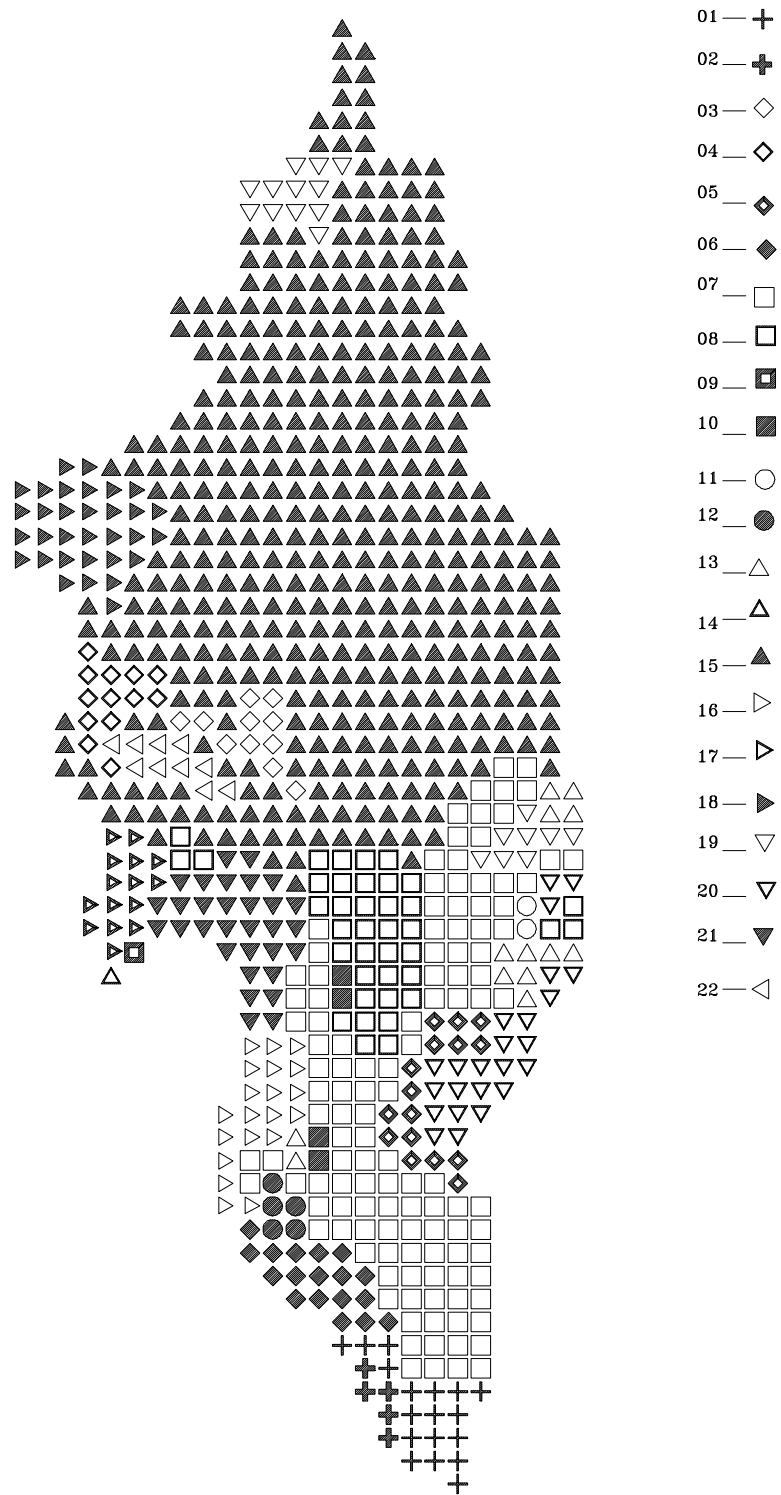


Figura 8.3: Classes de ocupação do solo na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas.

Se considerarmos o valor relativo à duração da chuva (T_d) o coeficiente de subida (r) é

o dado pela seguinte expressão :

$$r = \frac{T_a}{T_d} \quad (8.2)$$

Onde,

r - coeficiente de subida.

T_a - tempo de subida do hietograma, h .

T_d - duração da chuvada, h .

O tempo de recessão da chuvada é dado por :

$$T_b = T_d - T_a = (1 - r) \cdot T_d \quad (8.3)$$

Tabela 8.2: Valores de coeficientes de subida de tempestade em vários locais (Wenzel (1982) *in* Chow [15]).

Local	r	Referência
Baltimore	0,399	McPherson (1958)
Chicago	0,375	Keifer e Chu (1957)
Chicago	0,294	McPherson (1958)
Cincinnati	0,325	Preul e Papadakis (1973)
Cleveland	0,375	Havens e Emerson (1968)
Gauhati, India	0,416	Bandyopadhyay (1972)
Ontario	0,480	Marsalek (1978)
Philadelphia	0,414	McPherson (1958)

Um (r) de 0,5 corresponde ao pico da chuvada ocorrer a meio desta. Para a definição do hietograma associado à Ribeira da Meia Léguas foi considerado que o coeficiente de subida ($r = 0,333$) o que significa que o pico da chuvada de uma hora acontece aos 20 minutos. A metodologia utilizada para a realização do hietograma foi realizada de acordo com o quadro (8.4) (pag. 93). A operação associada a cada coluna é a seguinte :

- Coluna (1) : Tempo total em que decorre a chuvada (min).
- Coluna (2) : Tempo relativo ao pico da chuvada em termos de tempo de subida e tempo de descida (min).
- Coluna (3) : Determinação da intensidade pluviométrica ($\frac{mm}{h}$).

$$I_h(i) = 202,72 \cdot t^{-0,577} = 202,72 \cdot (2)^{-0,577} \quad (8.4)$$

Tabela 8.3: Intensidades de precipitação por tempo de retorno para chuvas com a duração de 60 minutos [24]

Tr (anos)	a	b	I ($\frac{mm}{h}$)
2	202,72	- 0,577	19,1
5	259,24	- 0,562	26,0
10	290,58	- 0,549	30,7
20	317,74	- 0,538	35,1
50	349,54	- 0,524	40,9
100	365,62	- 0,508	45,7

Tabela 8.4: Determinação do hietograma adimensional associado a uma chuvada de 60 minutos com um coeficiente de subida de ($T_d = 1$ h, $r = 0,333$).

Td (min) (1)	Ta , Tb (min) (2)	I ($\frac{mm}{h}$) (3)	ΔP (mm) (4)	ΔP (adim.) (5)
1	20	35,99	—	—
2	19	37,07	0,018	0,0031
3	18	38,25	0,020	0,0034
...	...	...	...	...
19	2	135,89	0,472	0,0815
20	1	202,72	1,114	0,1933
21	2	135,89	1,114	0,1933
...	...	...	...	...
59	40	24,13	0,006	0,0010
60	41	23,79	0,006	0,0010
61	42	23,46	0,005	0,0010
			5,76	1,0000

- Coluna (4) : Incremento de precipitação (mm).

$$\Delta P(i) = (I_t - I_{(t-1)}) \cdot \Delta t = ((3)_i - (3)_{(i-1)}) \cdot \frac{1}{60} \quad (8.5)$$

- Coluna (5) : Incremento de precipitação (adim.).

$$\Delta P_{adim}(i) = \frac{\Delta P_i}{\sum_{i=1}^n \Delta P_i} = \frac{(4)_i}{\sum_{i=1}^n (4)_i} \quad (8.6)$$

A partir do hietograma adimensional é possível gerar um hietograma de precipitações e de intensidades pluviométricas para qualquer chuvada para as condições impostas ($T_d = 1$ h, $r = 0,333$).

- Determinação do hietograma para a chuva total de P (mm).

$$P(i) = \Delta P_{adim}(i) \cdot P \quad (8.7)$$

- Determinação do hietograma de intensidade pluviométrica para a chuva total de P (mm) :

$$I(i) = \frac{\Delta P_{adim}(i) \cdot P}{\Delta t} \quad (8.8)$$

O hietograma adimensional está representado na figura (8.4) (pag. 94). No gráfico apresentado podemos observar o hietograma parcial acumulado.

8.4 Valores gerados pelo modelo

É possível estudar qualquer célula dentro da bacia hidrográfica, sendo inclusivé possível visualizar a variação de valores gerados em toda a bacia hidrográfica caso seja desenvolvida ou adaptada uma ferramenta gráfica. Para o presente caso foi fixada uma célula

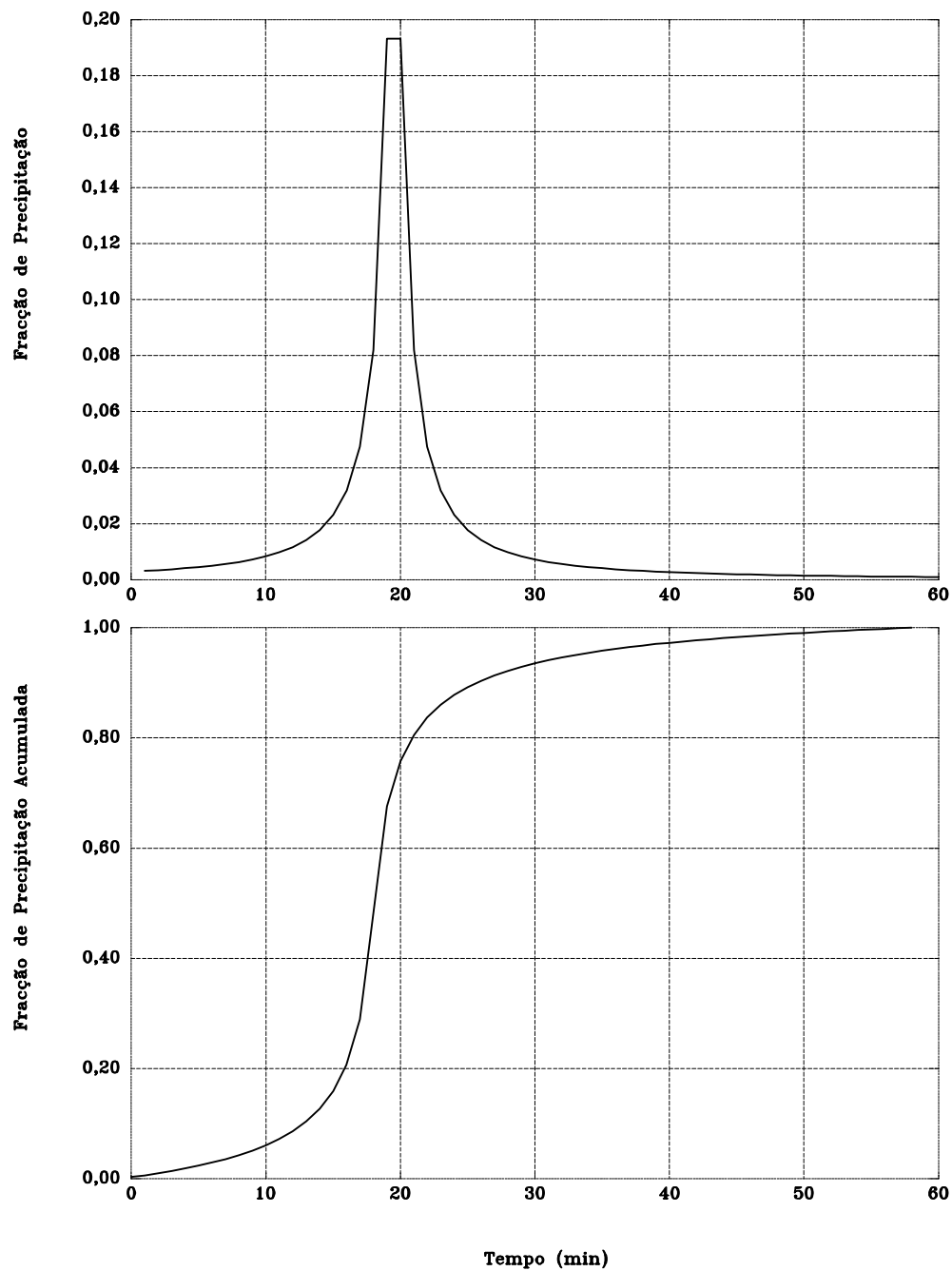


Figura 8.4: Hietograma adimensional para uma chuva de 60 minutos.

(secção de vazão da bacia hidrográfica).

Foram gerados valores para 100, 500, 1 000, 2 000 e 3 000 variáveis aleatórias para a precipitação de 20 mm e considerando a humidade do solo em AMCII, correspondente a uma precipitação total de 13 mm a 28 mm nos cinco dias anteriores no período dormiente e de 36 mm a 53 mm no período de crescimento.

Na figura (8.5) (pag. 97), podemos ver a rede de drenagem gerada pelo modelo desenvolvido.

Na figura (8.6) (pag. 98), podemos avaliar o escoamento em função da precipitação. No gráfico estão marcados pontos associados a tempos de retorno.

Na figura (8.7) (pag. 99), está representada a relação entre o escoamento e a massa de poluentes (azoto total) lixiviada. Cada valor representado no gráfico foi gerado com 3 000 variáveis aleatórias pelo método de Monte Carlo, para a situação de percentil 50.

A figura (8.8) (pag. 100) corresponde às concentrações médias de arrastamento de poluentes. Foi obtida pela relação entre a massa transportada, figura (8.7) (pag. 99) e o volume de água escoado (8.6) (pag. 98).

Na figura (8.9) (pag. 101) está representada a relação entre o escoamento e a massa de sedimentos transportados. Cada valor representado no gráfico foi gerado com 3 000 variáveis aleatórias pelo método de Monte Carlo, para a situação de percentil 50. Ao contrário do gráfico relativo ao azoto total, este apresenta alguma instabilidade. Este facto tem a ver com o número de variáveis aleatórias consideradas (3 000), uma vez que no modelo exponencial temos duas variáveis (não têm o mesmo peso na expressão) no de geração e transporte de sedimentos temos três (as três têm o mesmo peso na expressão) provocando mais instabilidade.

A figura (8.10) (pag. 102) corresponde às concentrações médias de arrastamento de poluentes. Este gráfico foi obtido pela relação entre a massa transportada, figura (8.9) (pag. 101), e o volume de água escoado, figura (8.6) (pag. 98). Para valores de baixo escoamento (≤ 2 mm) apresenta valores de concentração de sedimentos relativamente altos comparando com os outros escoamentos. É de referir que o método de Roehl é insensível ao escoamento. A capacidade de transporte de sedimentos apenas depende da área da bacia hidrográfica. Para uma análise mais correcta desta grandeza seria desejável a utilização de um modelo com características físicas, como aquele apresentado no apêndice (F) (pag. 130).

No apêndice (I) (pag. 142) apresentam-se os gráficos gerados pelo modelo relativamente ao azoto total e sedimentos para a situação de 100, 500, 1 000, 2 000 e 3 000 variáveis aleatórias.

Ao observarmos os gráficos verificamos que quanto maior o número de variáveis aleatórias mais a curva real (traço contínuo) do modelo se aproxima da curva teórica (tracejado).

Para a verificação da estabilidade do modelo foi considerada uma variável de controlo (coeficiente de variação) que é calculada 20 vezes durante o cálculo. Através desta variável verificamos se o modelo estabilizou ou se, pelo contrário, instabilizou.

Se olharmos para os gráficos dos coeficientes de variação, verificamos que, regra geral, vão aumentando a sua estabilização com o número de variáveis aleatórias.

A definição do equilíbrio entre o número de variáveis aleatórias e a estabilização é importante, porque o tempo de cálculo aumenta de uma forma exponencial com o número de variáveis geradas, uma vez que estas são geradas por célula. Assim para o modelo proposto, em bacias hidrográficas de médias e grandes dimensões, a geração de mais uma

variável aleatória significa que esta é multiplicada por cinco variáveis e pelo número de células.

Por este facto foi testada a geração de 300 000 variáveis para uma sub-bacia da Ribeira da Meia Léguas de nove células². No apêndice (I) (pag. 142) podemos verificar que os gráficos de frequências e frequências acumuladas (curvas teóricas e geradas) coincidem. Para a análise dos poluentes (azoto total) ao fim de 165 000 variáveis o modelo estabiliza e para os sedimentos inicia a sua estabilização ao fim de 180 000.

8.5 Calibração

A falta de dados de campo não permite a validação do modelo na bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas.

Nesta secção vai ser apresentada uma proposta de metodologia que possa ser aplicada na calibração do modelo na bacia hidrográfica.

Como podemos observar pelo quadro relativo às características e ocupação da bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas, estamos na presença de 22 classes de solo, as quais correspondem à sobreposição de nove tipos de solo e a 13 ocupações.

A caracterização das 22 classes de solo em uma única bacia tornar-se-ia incomportável do ponto de vista de custos. Como tal dividimos a bacia em sub-bacias e avaliamos o seu comportamento.

A caracterização dos diversos tipos de solo e ocupações deverão corresponder a um trabalho de classificação de acordo com o apresentado no capítulo (7) (pag. 83), onde são isoladas zonas homogêneas perfeitamente identificáveis, permitindo obter dados passíveis de serem associados às condições tipo da bacia hidrográfica piloto. Posteriormente estes dados serão aplicados noutras bacias hidrográficas (*e.g.* : bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas) como dados de partida para a caracterização de cada célula homogênea.

Face ao exposto e pelo facto de ter sido desenvolvido um modelo distribuído, onde é possível prever a carga de poluentes lixiviados em qualquer célula, na metodologia proposta não devemos fazer amostragens apenas na secção de controlo da bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas por forma a permitir estimar o comportamento do poluente em toda a área em estudo.

Sendo assim propõe-se a instalação de três estações de controlo, colocadas na linha de água principal e equidistantes entre si. Para o caso da ribeira da Meia Léguas é possível obter dados associados a uma zona homogênea na estação que fará as amostragens do primeiro terço da bacia hidrográfica. Esta é constituída por 12 hectares de figueiral, sendo o restante amendoal.

A metodologia passa pelas seguintes fases :

1. Antes do fenómeno hidrológico :

²A geração deste número de variáveis aleatórias para toda a bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas (845 células) representava dias de cálculo computacional contínuo, para os recursos informáticos disponíveis.

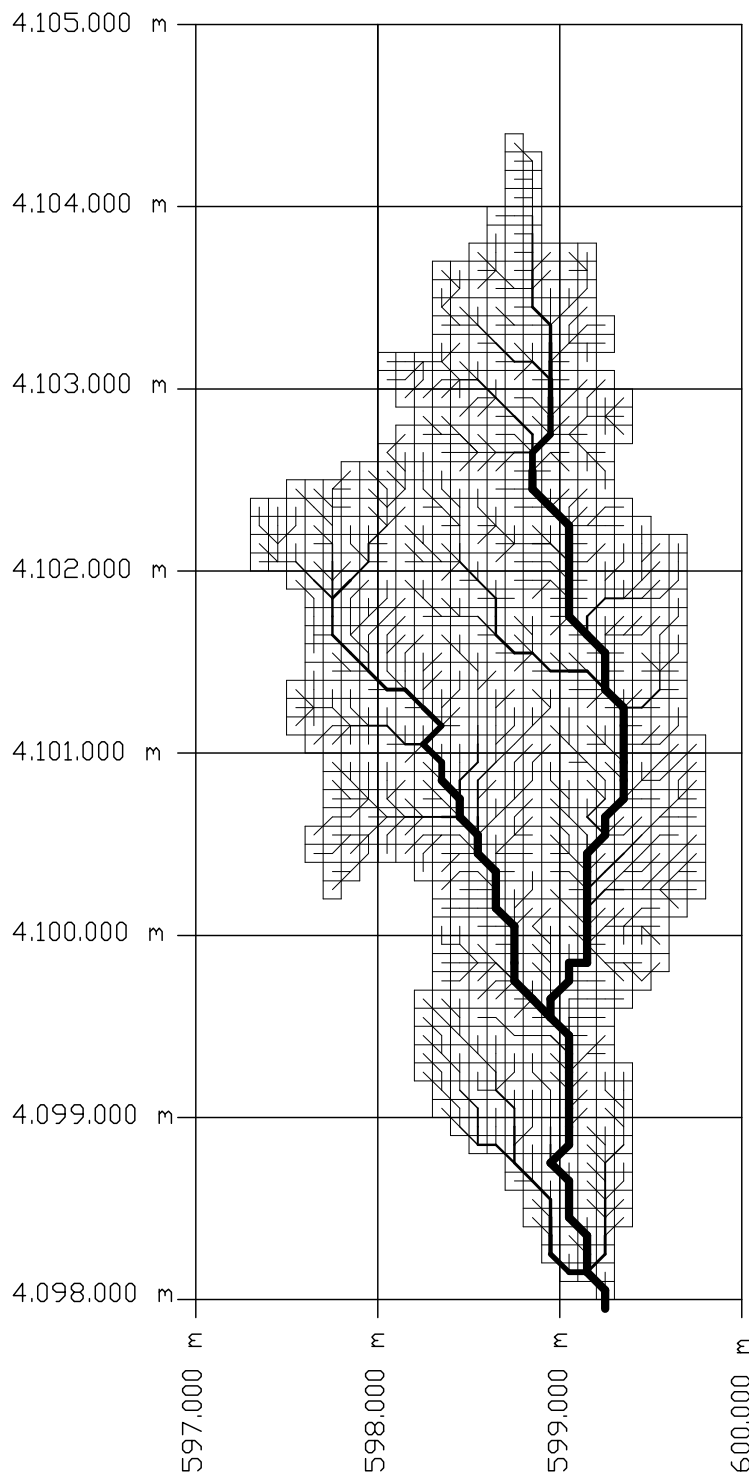


Figura 8.5: Rede de drenagem gerada pelo modelo.

- **Caracterização** - a primeira fase será o levantamento de todas as características da bacia hidrográfica e a definição das zonas homogêneas, de acordo com a metodologia utilizada neste trabalho na caracterização da ribeira da Meia

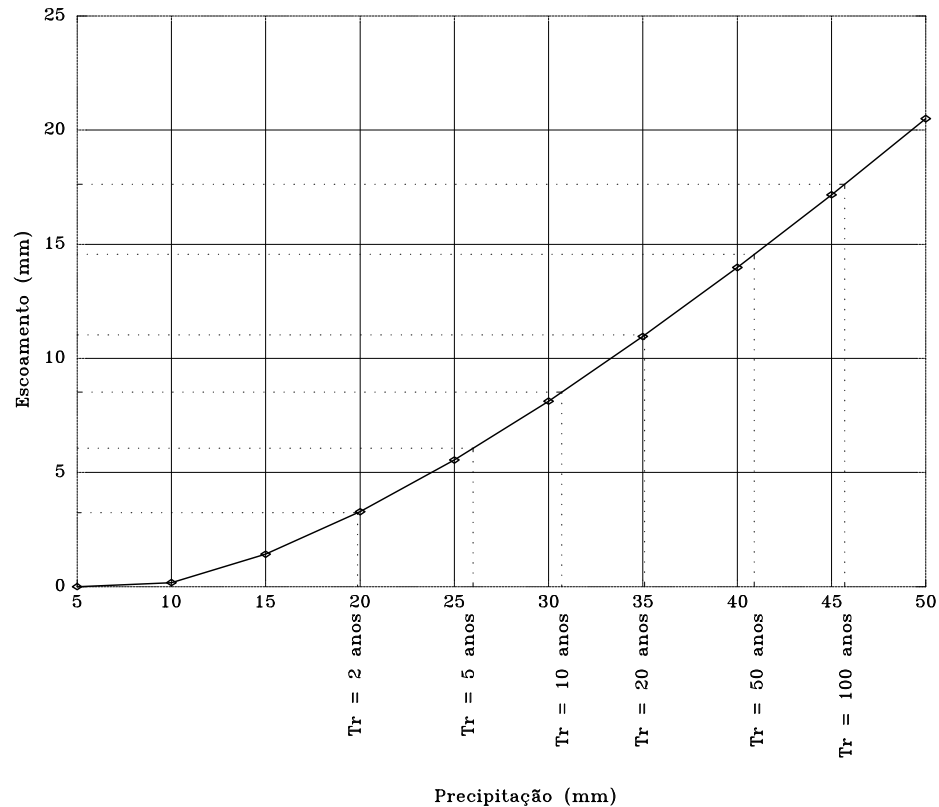


Figura 8.6: Relação entre a precipitação e o escoamento na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas e respectivos tempos de retorno. Tempo de precipitação de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

Léguas.

- **Recolha de amostras** - recolha de amostras de solo no horizonte A, nas diversas classes de ocupação (22 classes).
- **Caracterização do solo** - determinação das fracções de areia, argila, limo, matéria orgânica, poluente(s) (X_0) e humidade nas diversas amostras de solo.
- **Instalação de equipamento** - em cada estação deverá ser colocado para :
 - **Determinação da lixiviação de poluentes** - instalação de um amostrador automático que permita a obtenção de quatro a seis amostras do escoamento ao longo do fenómeno hidrológico em cada uma das estações.
 - **Determinação do excesso hídrico** - instalação de um medidor de caudal que permita a obtenção do hidrograma de cheia e volume acumulado ao longo da precipitação em cada uma das estações.
 - **Medição da precipitação** - instalação de um hidrógrafo no centro de gravidade da bacia hidrográfica que permita a obtenção do hietograma da precipitação em estudo.

Em bacias de grande dimensão é desejável colocar diversos hidrógrafos ou correlacionar com estações meteorológicas fora da bacia hidrográfica, porque a pluviosidade pode não ser espacialmente uniforme, tal como acontece no início e no fim da época das chuvas.

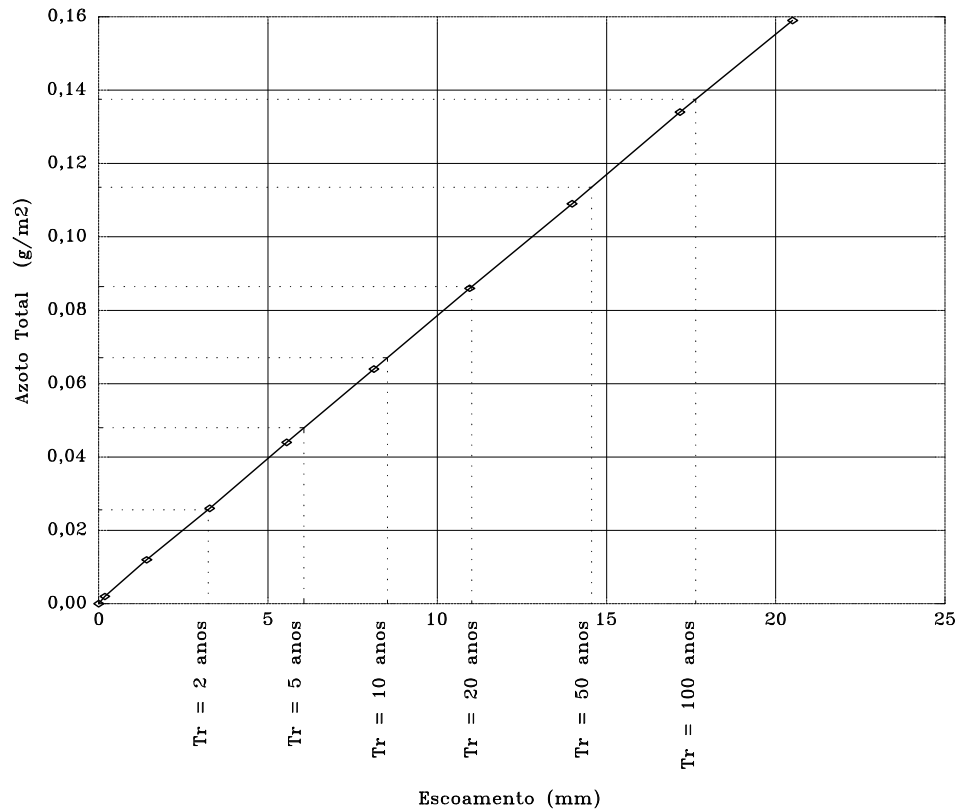


Figura 8.7: Relação entre o escoamento e a massa de poluente transportado na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas e respectivos tempos de retorno. Tempo de precipitação de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

2. Após o fenómeno hidrológico :

- **Caracterização dos lixiviados** - determinação da concentração de poluente no estado solúvel e particulado, assim como a concentração de sedimentos nas diversas amostragens ao longo do fenómeno hidrológico nas três estações de amostragem.
- **Caracterização da água da chuva** - determinação da concentração do(s) poluente(s) em estudo na água da chuva, obtida no hidrógrafo, para a determinação da parcela transportada pela precipitação.
- **Tratamento dos dados** - após a recolha de toda a informação passamos para a fase do tratamento de dados, que corresponde a :
 - **Coefficiente de Arrastamento (c) e carga inicial de poluentes a serem transportados (P_0)** - para a determinação do coeficiente de arrastamento de poluentes dissolvidos (c) utiliza-se a metodologia proposta por Millar [42]. Através das diversas amostragens (quatro a seis) ao longo do fenómeno hidrológico é possível determinar (C_0) e (c) através do ajustamento da expressão:

$$C = C_0 \cdot e^{-c \cdot R}$$

A determinação de (P_0) é feita pela expressão proposta por Millar [42]:

$$P_0 = \frac{C_0 \cdot A}{c}$$

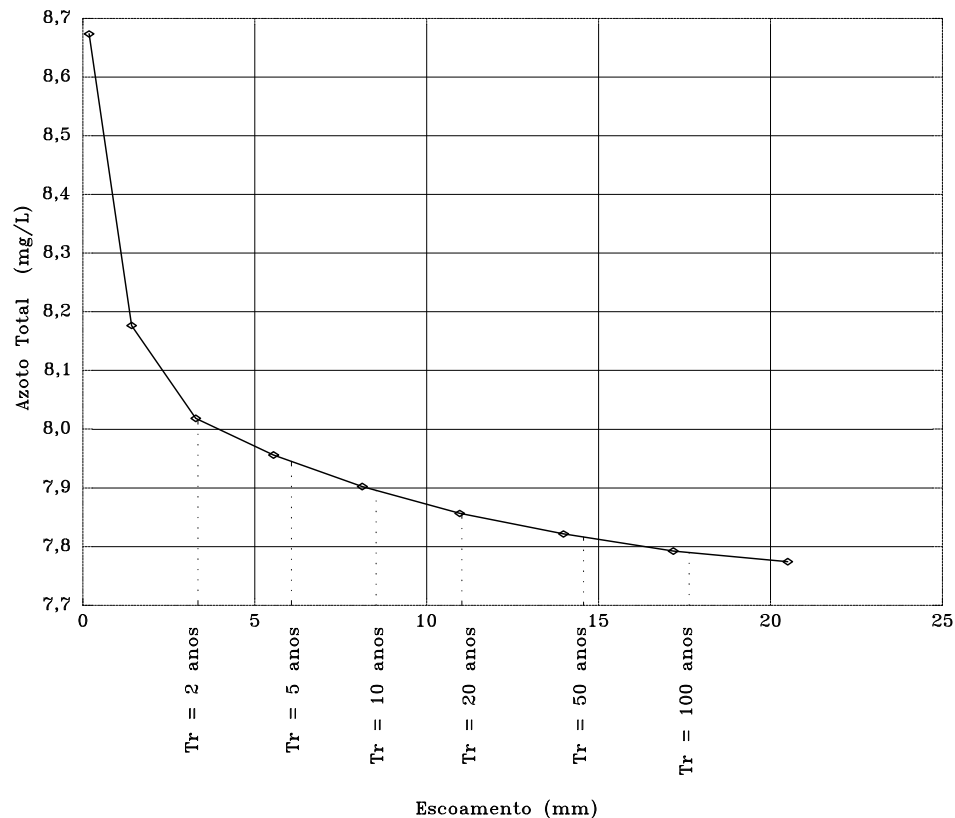


Figura 8.8: Relação entre o escoamento e a concentração média de poluente transportado na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas e respectivos tempos de retorno. Tempo de precipitação de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

Obtêm-se assim os valores de (c) e (P_0) associados a um determinado coeficiente de correlação (r^2) . O coeficiente de correlação varia de zero a um e deve estar o mais próximo possível da unidade.

- **Factor de migração do poluente para superfície em zonas permeáveis (k)** - a determinação da parcela de poluente existente no horizonte A que corresponde àquela que vai ser lixiviada pelo escoamento superficial é determinada por :

$$k = \frac{X_0}{P_0 \cdot R_t} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot R_t \cdot \frac{P-R}{n-\theta_0}}\right)$$

- **Coeficiente de enriquecimento (C_E)** - conhecendo a concentração do poluente no solo e nos sedimentos amostrados é possível a determinação do coeficiente de enriquecimento.

$$C_E = \frac{f_{XR}}{f_{X0}}$$

- **Determinação da poluição difusa** - após o tratamento dos dados das três estações, da forma como foi anteriormente apresentada, é possível estimar a poluição difusa arrastada pelo escoamento superficial, na forma dissolvida e particulada, permitindo assim determinar o comportamento do poluente ao longo da bacia hidrográfica, associando-a ao modelo distribuído desenvolvido.

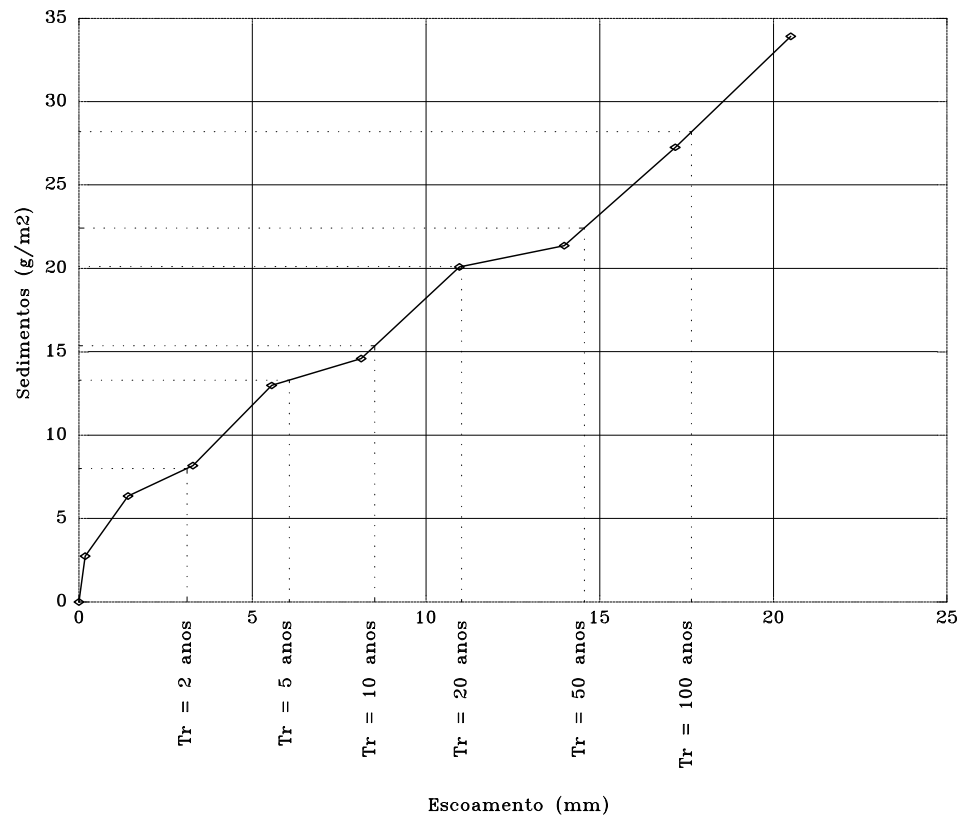


Figura 8.9: Relação entre o escoamento e a massa de sedimentos transportados na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas e respectivos tempos de retorno. Tempo de precipitação de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

- **Método de Monte Carlo** - para a aplicação do método de Monte Carlo é necessária a realização de diferentes medições, por forma a obter-se uma média e desvio padrão de cada variável em cada sub-bacia, associado ao(s) poluente(s) em estudo.

Após a conclusão deste trabalho é possível calibrar o modelo para as condições do local, e posteriormente fazer simulações para futuras intervenções na bacia hidrográfica e para fenómenos hidrológicos de diferentes tempos de retorno e avaliar o impacto no meio receptor.

Outra das vantagens desta metodologia é a possibilidade de poder estimar o comportamento do poluente ao longo da toda a bacia hidrográfica apenas conhecendo algumas secções de controlo.

Utilizando o método de Monte Carlo podemos ainda estimar as cargas de poluentes associadas à probabilidade de um determinado valor não ser excedido. Sem a aplicação desta metodologia não é possível saber se os valores simulados são os mais frequentes ou os mais raros. Sendo assim, se conhecermos a média e o desvio padrão das variáveis do modelo, é possível avaliar de uma forma mais segura o risco de poluição do meio hídrico superficial associado a determinadas condições de ocupação de uma bacia hidrográfica.

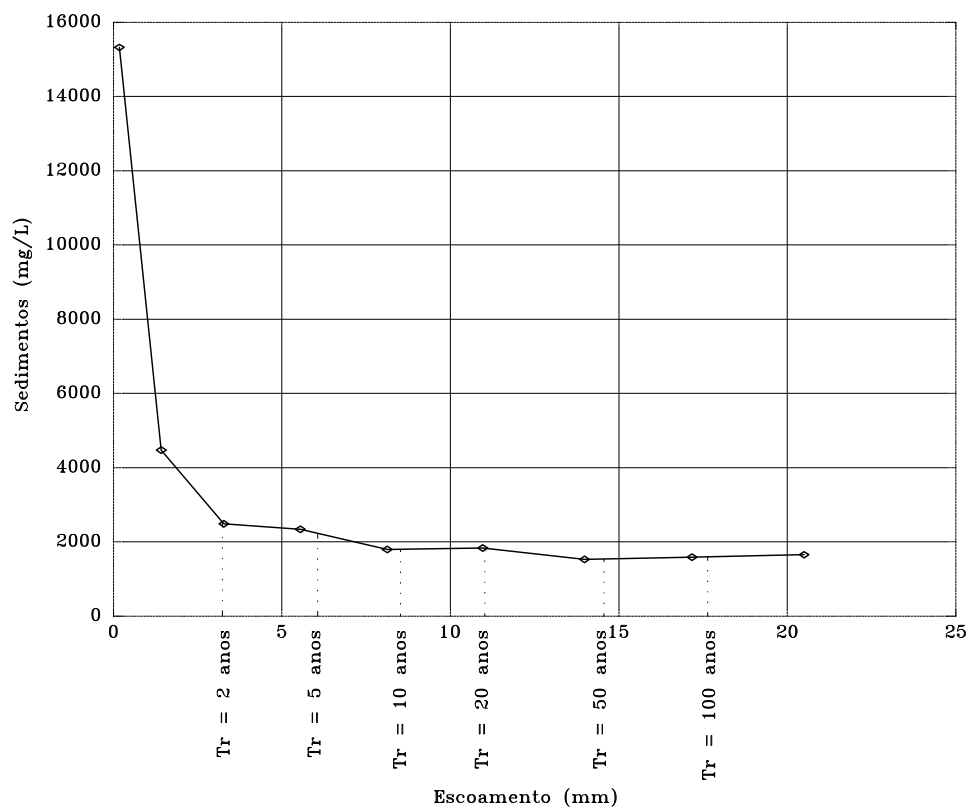


Figura 8.10: Relação entre o escoamento e a concentração de sedimentos transportados na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léguas e respectivos tempos de retorno. Tempo de precipitação de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

Capítulo 9

Considerações finais

Ao longo deste trabalho pretendeu-se propor uma metodologia para a quantificação dos poluentes de origem difusa que são lixiviados numa bacia hidrográfica devido à ocorrência de uma chuvada, a partir do mínimo de informação de campo.

Os modelos conceptuais são aqueles que apresentam um maior equilíbrio entre a fiabilidade da informação obtida e o volume de informação de campo. É referido por alguns autores [23, 42] que modelos criados recentemente adoptam abordagens conceptuais enquanto que modelos físicos têm vindo a tornar-se conceptuais conforme vão sendo feitas novas versões, como é o caso do *SWMM - Storm Water Management Model* desenvolvido pela USEPA. Algumas razões associadas a este facto são:

- A complexidade associada aos modelos físicos. Estes necessitam de grande quantidade de informação que nem sempre é de fácil obtenção. Face a estas dificuldades nem sempre é possível tirar partido do rigor de resultados de um modelo físico.
- Os modelos empíricos ou estatísticos necessitam de grande quantidade de dados e não apresentam uma fiabilidade adequada do fenómeno, face ao esforço necessário para o calibrar. Não é fácil a sua extrapolação para outros casos sem grandes erros associados.
- Os modelos conceptuais têm a vantagem de se situarem a meio termo entre os modelos empíricos ou estatísticos e os modelos físicos. Face aos modelos empíricos, não necessitam de tanta informação de base e podem facilmente ser extrapolados para outras situações com alguma calibração. Face aos modelos físicos, o volume de informação a introduzir é menor fazendo com que o erro associado a um modelo conceptual possa ser compensado com o erro associado a uma deficiente definição das variáveis de entrada dos modelos físicos, e para que este risco não aconteça é necessário um grande esforço de calibração de variáveis. Os modelos conceptuais são de mais fácil calibração que qualquer um dos outros dois referidos.
- Outro ponto a favor dos modelos conceptuais é o facto dos erros associados ao fenómeno de deposição de poluentes terem alguma expressão e o facto da utilização de um modelo muito rigoroso que necessite de informação calibrada não compensar.

Não se pretendeu dar uma resposta final sobre a qual seria o modelo ideal para uma aplicação equilibrada em termos de custos de aplicação, complexidade e erro, mas apontar caminhos para a sua concepção.

Embora os modelos conceptuais pareçam ser os mais adequados para a aplicação prática, será de concluir com este trabalho que o ideal é combinar o melhor de cada um dos tipos

de modelos (estatísticos, conceptuais e físicos) para se obter a resposta mais equilibrada. Sendo assim, sugere-se que face a alguns resultados obtidos o modelo desenvolvido sofra algumas alterações e/ou calibrações :

- O modelo exponencial para o transporte de poluentes face àquele (modelo físico) que é proposto no apêndice (E) (pag. 127) apresenta vantagens de aplicação e facilidade de respostas face à diferença de erros que se pode obter. Este modelo será de manter e melhorar, inclusivé a formulação proposta para a quantificação de poluentes disponíveis para serem arrastados nas zonas permeáveis.
- Relativamente aos sedimentos, e embora a Equação Universal da Perda de Solo (USLE) responda de uma forma satisfatória à erosão, a quantificação dos sedimentos transportados apresenta algumas deficiências que podem dar origem a resultados pouco lógicos (método de Roehl). Face ao exposto, sugere-se a substituição do modelo de transporte de sedimentos por um de características físicas, como o apresentado no apêndice (F) (pag. 130). Neste ponto a modelação de características físicas apresenta vantagens visíveis, com um pequeno aumento de complexidade para o modelo (do ponto de vista do utilizador).
- Para o modelo de transporte de sedimentos proposto (modelo físico) é necessário gerar hidrogramas de escoamento. Para tal, sugere-se a substituição da abordagem de balanço de massas do escoamento, pela aplicação do modelo de onda cinemática apresentado no apêndice (G) (pag. 133) ou aplicar outras metodologias que permitam determinar o hidrograma aliviando em termos de tempo de computação. Desta forma podemos também gerar polutogramas. Neste campo a abordagem física é vantajosa, havendo no entanto, alguns custos em termos de tempo de cálculo.
- Para a definição das variáveis relativas aos poluentes (no espaço e no tempo) a abordagem estatística é de grande utilidade. Será de manter a filosofia do método de Monte Carlo ou de outros que permitam estabelecer valores a utilizar no modelo. Com a aplicação de um modelo estatístico podemos garantir a representatividade dos dados e resultados do modelo.

Propõem-se os seguintes estudos para o desenvolvimento e aplicação do modelo de poluição difusa :

- Análise do modelo desenvolvido para a determinação do poluente (P_0) disponível em zonas permeáveis com base em dados de campo.
- Calibração dos parâmetros (k) e (c) no modelo exponencial de transporte de poluentes para os diversos tipos de solo (A, B, C, D), valores de CN e ocupação humana. Criação de uma base de dados com estes valores para que a aplicação da metodologia a qualquer bacia possa ser efectuada com a aproximação adequada (necessidade de pouca informação de calibração). Pretende-se que a caracterização da bacia hidrográfica, em termos de cargas de poluentes, seja de igual dificuldade na definição das características das condições de escoamento (método do *Soil Conservation Service*) e na quantificação da erosão (USLE), onde através da consulta dos quadros conseguimos caracterizar as variáveis em jogo no fenómeno sem grande erro. Estas podem ser, posteriormente, aferidas em campo.
- Verificação de qual a distribuição que melhor se ajusta (Gausseana, lognormal, etc.) para a aplicação do método de Monte Carlo, embora a bibliografia refira que a melhor é a lognormal.

- Estudo de metodologias de simulação espacial e temporal (simulação num modelo contínuo) que permitam uma abordagem estatística do problema aligeirando o tempo de cálculo computacional. O método de Monte Carlo é caracterizado por grandes exigências a este nível.
- Integração da simulação do transporte de poluentes (abordado neste trabalho) com a dos fenómenos hidrológicos ao longo do ano.

Em suma, em desenvolvimentos futuros devemos estudar metodologias que optimizem o rigor da modelação, a simulação espacial e temporal, o tempo de cálculo computacional, a exigência de dados e a simplicidade de utilização.

Bibliografia

- [1] Álvares, M. T. P.; Pimenta, M. T. (1998). *Erosão Hídrica e Transporte Sólido em Pequenas Bacias Hidrográficas*. 4o. Congresso da Água - A Água como Recurso Estruturante do Desenvolvimento. Lisboa.
- [2] Barret M. E.; Irish Jr., L. B.; Malina Jr., J. F.; Chabernau, R. J. (1998). *Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 124. N^o 2.
- [3] Bartone, D. M.; Christopher, G. Echlin (1999). *Comparison of Pollutant Removal Efficiency for Two Residential Storm Water Basins*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 125. N^o 7.
- [4] Bear, J.; Verruijt, A. (1987). *Modelling Groundwater Flow and Pollution - Theory and Applications of Transport in Porous Media*. D. Reidel Publishing Company.
- [5] Bourrier, R. (1991). *Les Réseaux D'assainissement - Calcul, Applications, Perspective*. 3^e édition. Lavoisier - Tec & Doc.
- [6] *Carta Agrícola e Florestal de Portugal*. Cartas n^{os} 607 e 611. Escala 1/25 000. Serviço de Reconhecimento e de Ordenamento do Território. Secretaria de Estado da Agricultura. Ministério da Economia.
- [7] *Carta de Solos de Portugal*. Carta n^o 53-A. Escala 1/50 000. Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário. Secretaria de Estado da Agricultura. Ministério da Economia.
- [8] *Carta Militar de Portugal*. Cartas n^{os} 607 e 611. Escala 1/25 000. Serviço de Cartográfico do Exército.
- [9] Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações - Fundamentos*. Volume 1. 6^a Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora, S.A. Brasil.
- [10] Cárdenas, J. F. O. (1996). *Spatially Distributed Modeling of Storm Runoff and Non-Point Source Pollution Using Geographic Information Systems*. Ph.D. Dissertation. University of Texas. Austin.
- [11] Cardoso, A. H. (1998). *Hidráulica Fluvial*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- [12] Cardoso, J. V. J. de C. (1965). *Os Solos de Portugal - Sua Classificação, Caracterização e Génese (1 - A Sul do Rio Tejo)*. Secretaria de Estado da Agricultura - Direcção Geral dos Serviços Agrícolas. Lisboa.
- [13] Castro, P. P. (1986). *Estudo Ambiental do Estuário do Tejo - Estimação e Controlo da Poluição Difusa no Estuário do Tejo*. Secretaria do Ambiente e Recursos Naturais.
- [14] Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

- [15] Chow, V.T.; Maidment, D. R.; Mays, L.W.(1988). *Applied Hidrology*. McGraw-Hill.
- [16] Conte, S. D.; Boor, C. de (1980). *Elementary Numerical Analisys - An Algorithmic Approach* . Third Edition. International Student Edition. McGraw-Hill Inc.
- [17] Correia, A. G. (1987). *Ensaio Para Controlo de Terraplanagens*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- [18] Correia, F. N. (1984). *Proposta de um Método Para a Determinação de Caudais de Cheia em Pequenas Bacias Naturais e Urbanas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- [19] Correia, F. N. (1984). *Alguns Procedimentos Adoptados Pelo Soil Conservation Service para o Estudo do Impacto da Urbanização nos Caudais de Cheia*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- [20] Debo, T. N.; Reese, A. J. (1995). *Municipal Storm Water Management*. Lewis Publishers. CRC Press, Inc..
- [21] Deletic, A. B.; Maksimovic, C. T. (1998). *Evaluation of Water Quality Factors in Storm Runoff from Paved Areas*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 124. N^o. 9.
- [22] Delleur, J. W. (1998). *The Handbook of Groundwater*. CRC PRESS - Springer.
- [23] Delville, J.-C. L. (1994). *Deppoluer les Eaux Pluviales - Contribution à L'élaboration d'une Stratégie*. OTV.
- [24] *Decreto Regulamentar 23/95 de 23 de Agosto*.
- [25] *Decreto-Lei 152/97 de 19 de Junho*.
- [26] *Decreto-Lei 2/88 de 20 de Janeiro*.
- [27] *Decreto-Lei 235/97 de 3 de Setembro*.
- [28] *Decreto-Lei 236/98 de 1 de Agosto*.
- [29] Fisher, T. S.; Hayward, D. G.; Stephens, R. D.; Stenstrom, M. K. (1999). *Dioxins and Furans Urban Runoff*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 125. N^o. 2.
- [30] Gachter, R.; Ngatiah, J. M.; Stamm, C.(1998). *Transport of Phosphate from Soil to Surface Waters by Preferencial Flow*. **Environmental Science & Technology**. Vol 32. N^o. 13.
- [31] Gros, A. (1981). *Abonos - Guia Practica de la Fertilizacion*. 7^a edição. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- [32] Hjelment, A. ; Menghua, W. (1999). *Modeling Hydrologic and Water Quality Responses to Grass Waterways*. **Journal of Hydrological Engineering**. Vol. 4. N^o. 3.
- [33] Hudson, N. (1982). *Conservation del Suelo*. Editorial Reverté, s.a.
- [34] Irish Jr., Lyn B.; Barret, M. E.; Malina Jr., J; Charbeneau, R. J. (1998). *Use Regression Models for Analyzing Highway Storm Water Loads*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 124. n^o. 10.

- [35] Julien, P. Y. (1995). *Erosion and Deposition*. Cambridge University Press.
- [36] Kopp, E.; Sobral, M.; Soares, T., Woerner, M (1989). *Os solos do Algarve e as suas Características*. Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação (DGHEA) - direcção Geral da Agricultura do Algarve (DRAA) - Sociedade Alemã de Cooperação Técnica (GTZ). Faro.
- [37] Lança, R. (2000). *Contributo para o Estudo de Cheias Recorrendo a um Modelo Distribuído*. Tese de Mestrado. Universidade de Évora.
- [38] Lencastre, A.; Franco, F. M. (1992). *Lições de Hidrologia*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [39] Linsley, Ray K.; Kholer, M. A.; Paulhus, J. L. H. (1988). *Hydrology for Engineers*. SI Metric Edition. McGraw-Hill Book Co.
- [40] Liu, D. H. F.; Lipták, B. G. (2000). *Groundwater and Surface Water Pollution*. Lewis Publishers.
- [41] Maidment, D. R. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc.
- [42] Millar, R. G. (1999). *Analytical Determination of Pollutant Wash-Off Parameters*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 125. N.º 10.
- [43] Ministério da da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas (1997). *Código de Boas Práticas Agrícolas - Para a Protecção da Água Contra a Poluição com Nitratos de Origem Agrícola* Lisboa.
- [44] Miyazaki, T. (1993). *Water Flow in Soils*. Marcel Dekker, Inc.
- [45] Mizgalwicz, P. J.; Maidment, D. R. (1996). *Modeling Agrichemical Transport in Mid-west Rivers Using Geographic Information Systems*. Center for Research in Water Resources - Bureau of Engineering Research. University of Texas.
- [46] Novotny, V. (1995). *Nonpoint Pollution and Urban Stormwater Management*. Water Quality Management Library. Technomic Publishing Co., Inc.
- [47] Novotny, V.; Olem, H. (1994). *Water Quality - Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- [48] Parr, A.; Zou, S.; McEnroe, B. (1998). *Effects of Infiltration on Agricultural Runoff Contamination*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 124. N.º 9.
- [49] Pimenta, M. T. (1998a). *Directrizes para a Aplicação da Equação Universal de Perda dos Solos em SIG - Factor de Cultura C e Factor de erodibilidade do solo K*. INAG . http://www.inag.pt/snrh/estudos_proj/main_nav_fr.html.
- [50] Pimenta, M. T. (1998b). *Caracterização da Erodibilidade dos Solos a Sul do Rio Tejo*. INAG .http://www.inag.pt/snrh/estudos_proj/main_nav_fr.html.
- [51] *Proposta de Directiva Quadro*. (1997a). Bruxelas, 26 de Fevereiro de 1998.
- [52] *Proposta de Directiva Quadro*. (1997b). Bruxelas, 26 de Novembro de 1998.
- [53] *Proposta de Directiva Quadro*. (1998a). Bruxelas, 17 de Fevereiro de 1998.
- [54] *Proposta de Directiva Quadro*. (1998b). Bruxelas, 6 de Março de 1998.

- [55] *Proposta de Directiva Quadro*. (1998c). Bruxelas, 26 de Junho de 1998.
- [56] Rabinovich, Y. Z. (1994). *Hidráulica*. YPCC. Moscovo.
- [57] Raju, K.G.R.; Kothiyari, U.C., Srivastav,S.; Saxena,M. (1999). *Sediment Removal Efficiency of Settling Basins*. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. Vol. 125. N^o 5.
- [58] Reed, S.; Maidment, D.; Patoux, J. (1997). *Spatial Water Balance of Texas*. Center for Research in Water Resouces. University of Texas. Austin.
- [59] Rosewell, C. J.; Edwards, K. (1988). *Soiloss - a Program to Assist in the Selection of Management Practices to Reduce Erotion* . Soil Conservation Service of New Wales. Technical Handbook n^o 1.
- [60] Sansalone, J. L.; Koran, J.,M.; Smithson, J. A. Buchberger, S. G. (1998). *Physical Characteristics of Urban Roadway Solids Transported During Rain Events*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 124. N^o 5.
- [61] Santos, J. Q. dos (1991). *Fertilização - Fundamentos da Utilização dos Adubos e Coreectivos* . Colecção Euroagro. Publicações Europa-América.
- [62] Schultz, L. (1978). *Métodos de Conservação do Solo* . 2^a edição. Sagra.
- [63] Schwab, G. O.; Fangmeier, D. D.; Elliot, W. J.; Frevert, R. K. (1993). *Soil and Water Conservation Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.. Fourth Edition.
- [64] Singh, V. P.; Fiorentino, M.(1996). *Geographical Information Systems in Hidrology* . Water Science and Hydrology Library. Kluwer Academic Publishers.
- [65] Steinheimer, T. R.; Scoggin, K. D. (1998). *agricultural Chemical Movement throught a Field-Size Watershed in Iowa : Surface Hydrology and Nitrate Losses in Discharge* . **Environmental Science & Technology**. Vol 32. N^o 8.
- [66] Tackston, E. L.; Murr, A. (1999). *CSO control Project Modifications Based on Water Quality Studies*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 129. N^o 10.
- [67] Thevenot, D.; Tassin, B. (1993). *Rejets Urbains Par Temps de Pluie : Pollutions et Nuisancas*. Actes des troisièmes journées du Diplôme d'Etudes Approfondies Sciences et Techniques de L'environnement. Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées.
- [68] Troeh, F. R.; Hobbs, J. A.; Donahue, R. L. (1980). *Soil and Water Conservation - For Productivity and Environmental Protection* . Prentice-Hall, Inc..
- [69] Trudgill, S. T.; Walling, D. E.; Webb, B. W. (1999). *Water Quality - Processes and Policy* . John Wiley & Sons, Ltd .
- [70] Valiron, F.; Tabuchi, J.-P. (1992). *Maitrise de la Pollution Urbaine par Temps de Pluie - État de L'art*. Tec&Doc L'avoisier
- [71] Viklander (1998). *Particle Distribution and Metal Content in Street Sediments*. **Jour-nal of Environmental Engineering**. Vol. 124. N^o 8.
- [72] Vivancos, A. D. (1989). *Tratado de Fertilizacion* . 2^a edição. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

- [73] Walker Jr., F. R.; Stedinger, J. *Fate and Transport Model of Cryptosporidium* . **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 125. N^o. 4.
- [74] Wanielista, M.; Kersten, R.; Eaglin, R.(1997). *Hydrology - Water Quantity and Quality Control* . Jhon Wiley and Sons, Inc.. 2th Edition.
- [75] Watson, I; Burnett, A. D. (1995). *Hydrology* . CRC Press.
- [76] WEPP(1995). *WEPP - Water Erosion Prediction Project*. USDA - ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- [77] Wu, J. S.; Craig, J. A.; William, L. S.; Evett, J. B. (1998). *Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff*. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 124. N^o. 7.

Apêndice A

Poluição Difusa - Anexos

Tabela A.1: Contribuição da poluição pontual e difusa nos Estados Unidos (EPA *in* Novotny [46]).

Poluente	Fontes Pontuais (%)	Fontes Difusas (%)
CQO - Carência Química de Oxigênio	30	70
PT - Fósforo total	34	66
TKN - Azoto Kjeldhal Total	10	90
CF - Coliformes Fecais	10	90
Pb - Chumbo	43	57
Cu - Cobre	59	41
Cd - Cadmio	84	16
Cr - Cromio	50	50
Zn - Zinco	30	70
Ar - Arsénio	95	5
Hg - Mercúrio	98	2

Tabela A.2: Carga de poluentes ($\frac{g}{cabeca \cdot dia}$) na bacia hidrográfica do Rio Yodo, Japão, em 1983.(Goda e Nkanishi (1991) *in* Novotny [46])

Fonte	População	CBO	CQO	SS	NT	PT
Bovinos	3672	640	3000	3000	378	56
Suínos	19345	200	700	700	40	130

Tabela A.3: Persistência de alguns pesticidas (Kuhnt *in* Novotny [46])

Pesticida	meia vida (meses)	Desaparecimento a 95 % (anos)
Aldrina	3 - 8	1 - 6
Clordano	10 - 12	3 - 5
DDT	~ 30	4 - 30
Dieldrina	~ 27	5 - 25
Heptacloro	8 - 10	3 - 5
Lindano	12 - 20	3 - 10

Tabela A.4: Concentração de metais pesados nos sedimentos [71]

Local	Tráfego ($\frac{Veic}{d}$)	Cu ($\frac{mg}{kg}$)	Cd ($\frac{mg}{kg}$)	Pb ($\frac{mg}{kg}$)	Zn ($\frac{mg}{kg}$)
Zona residencial	5 000	—	—	—	—
$\phi < 1mm$		36	0,099	8,1	54
$\phi < 2mm$		35	0,08	6,6	49
Centro da cidade	4 500	—	—	—	—
$\phi < 1mm$		83	0,06	11	88
$\phi < 2mm$		73	0,049	8,4	72
Centro da cidade	20 000	—	—	—	—
$\phi < 1mm$		61	0,23	55	123
$\phi < 2mm$		56	0,22	43	104
$\phi < 4mm$		47	0,19	34	83

Tabela A.5: Deposição de sedimentos nas ruas pelo tráfego[71]

Local	Tráfego ($\frac{Veic}{d}$)	Carga ($\frac{g}{m}$)	Passeio
Zona residencial	1 500	62	Não
Zona residencial	5 000	85	Não
Centro da cidade	4 500	972	Sim
Centro da cidade	20 000	372	Não

Tabela A.6: Concentração média de poluentes nas águas de escorrência[71]

Poluente	Residências Urbanas $\frac{mg}{L}$	Zona Comercial $\frac{mg}{L}$	Pastagens $\frac{mg}{L}$	Citrinos $\frac{mg}{L}$	Floresta $\frac{mg}{L}$	Auto-estrada $\frac{mg}{L}$
CBO	7	87	5	64	4	116
SS	84	85	1 372	112	68	132
N_T	132	146	248	92	24	184
P_T	36	28	2	38	8	36
Pb	8	9	4	2	4	7
Cu	2	3	1	1	1	1
Zn	8	14	3	2	2	6

Tabela A.7: Valores indicativos da composição da água da chuva [23]

Parâmetros	Valores de Concentração
pH	4 - 7
CQO	20 - 30 $\frac{mg}{L} \cdot O_2$
SO_4	2 - 35 $\frac{mg}{L}$
Ca	0,5 - 2 $\frac{mg}{L}$
Na	0,5 - 2 $\frac{mg}{L}$
Zn	0,02 - 0,08 $\frac{mg}{L}$
Pb	0 - 0,15 $\frac{mg}{L}$

Tabela A.8: Poluição contida nos sedimentos. Chebbo (1991) *in* Valiron [70]

CQO	CBO_5	NKT	Hidrocarbonetos	P_b
83-92%	90-95%	65-80%	82-99%	97-99%

Tabela A.9: Remoção de poluentes por sedimentação. Chebbo (1991) *in* Valiron [70]

SST	CQO	CBO_5	NKT	Hidrocarbonetos	P_b
80-90%	60-90%	75-90%	40-70%	90%	65-80%

Tabela A.10: Tempo para remover 60 % dos sólidos Suspensos a 1,2 m de profundidade (Randall *et al.* *in* Valiron [70])

[SS] inicial ($\frac{mg}{L}$)	15	35	38	100	155	215	721
Tempo (h)	38	24	8	5	1,0	1,5	0,5

Tabela A.11: Massa de poluente por massa de sedimentos [70].

	Autoestrada ($\frac{g}{kg}$)	Semi-urbano ($\frac{g}{kg}$)	Urbano ($\frac{g}{kg}$)	Média ($\frac{g}{kg}$)
Cd	0,01	0,04	0,04	0,03
Co	0,04	0,07	0,04	0,05
Cr	0,18	0,12	0,15	0,15
Ni	0,18	0,12	0,12	0,14
Cu	0,64	0,51	0,58	0,58
Mn	0,73	0,84	0,62	0,73
Pb	1,9	1,2	2,3	-
Zn	12,6	3,7	13,4	-
Mg	19	23	21	21
Fe	75	74	69	73
Al	103	95	73	90

Tabela A.12: Cargas anuais de poluentes escoadas de zona agrícola e urbana. Sonzogni *et al.* (1980) *in* Thevenot [67]

	SST ($\frac{ton}{ha \cdot ano}$)	Ptot ($\frac{kg}{ha \cdot ano}$)	N ($\frac{kg}{ha \cdot ano}$)	Pb ($\frac{kg}{ha \cdot ano}$)	Zn ($\frac{kg}{ha \cdot ano}$)
Zona Agrícola					
Cereais	0,2 - 7	0,2 - 4,6	4,3 - 31	0,005 - 0,006	0,014 - 0,064
Pastagem	0,03 - 7	0,1 - 0,5	3,2 - 14	0,004 - 0,015	0,021 - 0,038
Floresta	0,1 - 0,6	0,02 - 0,4	1 - 6,3	0,01 - 0,03	0,02 - 0,03
Zona Urbana					
Residencial	0,6 - 2,3	0,4 - 1,3	5 - 7,3	0,06	0,02
Comercial	0,05 - 0,8	0,1 - 0,9	1,9 - 11	0,17 - 1,1	0,25 - 0,43
Industrial	0,5 - 1,7	0,9 - 4,1	1,9 - 14	2,2 - 7	3,5 - 12

Apêndice B

Modelação de lagoas de sedimentação

Para a modelação de lagoas de sedimentação em condições hidrodinâmicas são propostos dois métodos.

B.1 Metodologia proposta por Fair & Geyer (1954)

O dimensionamento de lagoas de sedimentação para condições hidrodinâmicas de acordo com as recomendações da EPA (1986) é realizado segundo a seguinte metodologia [70].

A expressão utilizada é baseada numa outra obtida por Fair & Geyer (1954) *in* Valiron [70].

$$R_d = 1,0 - \left[1,0 + \frac{1}{n} \frac{\omega}{\frac{Q}{A}} \right]^{-n} \quad (\text{B.1})$$

Onde,

R_d - fracção de sólidos decantados quando a lagoa de sedimentação funciona em condições hidrodinâmicas.

ω - velocidade de sedimentação das partículas.

Q - caudal de ponta.

A - área da lagoa.

n - índice de turbulência utilizado para indicar o comportamento da lagoa.

Fair & Geyer (1954) *in* Valiron [70] sugere os seguintes valores de (n):

- $n = 1$ - comportamento medíocre.
- $n = 2$ - comportamento Bom.
- $n > 5$ - comportamento muito bom.
- $n = \infty$ - comportamento ideal.

Quando ($n \rightarrow \infty$), a equação é apresentada da seguinte forma:

$$R_d = 1,0 - e^{-kt} \quad (\text{B.2})$$

$$k = \frac{\omega}{h} \quad (\text{B.3})$$

$$t = \frac{V}{Q} \quad (\text{B.4})$$

Onde,

k - coeficiente da taxa de sedimentação.

h - altura média da lagoa.

t - tempo de retenção.

$\forall$ - volume da lagoa de sedimentação.

Segundo Julien [35] a velocidade de sedimentação de uma partícula de diâmetro d_s e para uma gama larga de números de Reynold pode ser obtida pela seguinte expressão :

$$\omega = \frac{8\nu_m}{d_s} \left(\sqrt{1 + 0,0139 \cdot d_*^3} - 1 \right) \quad (\text{B.5})$$

$$d_* = d_s \left[\frac{(G - 1)g}{\nu_m^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{B.6})$$

Onde,

ω - velocidade de sedimentação das partículas de diâmetro d_s , $\frac{m}{s}$.

ν_m - viscosidade cinemática¹ da mistura, $\frac{m^2}{s}$.

G - densidade das partículas. $\approx 2,65$.

g - aceleração da gravidade, $9,80665 \frac{m}{s^2}$.

Para partículas com diâmetros inferiores a $40\mu m$ devemos atender à floculação [35]. De acordo com Julien [35] a floculação não tem importância para partículas com diâmetros superiores a $0,04mm$. A determinação de partículas com o efeito da floculação ($d_s < 40$) é dado por :

$$\omega_f = \frac{250}{d_s^2} \cdot \omega \quad (\text{B.8})$$

B.2 Metodologia proposta por Raju *et al.*(1999)

Raju *et al.*[57] apresenta uma formulação que nos dá o rendimento da lagoa de sedimentação. Este é dado por :

$$\eta = \frac{q_{si} - q_{se}}{q_{si}} \quad (\text{B.9})$$

Onde,

η - eficiência da lagoa.

q_{si} - massa de sedimentos que entra na lagoa por unidade de tempo, $\frac{kg}{s}$.

q_{se} - massa de sedimentos que sai da lagoa por unidade de tempo, $\frac{kg}{s}$.

Foi ainda constatado em todas as lagoas estudadas, que sempre que para $\left(\frac{\omega}{u_*} \right) > 2,5$ o rendimento é de 100%.

Onde,

ω - velocidade de sedimentação da partícula.

u_* - velocidade de arrastamento da partícula no canal de aproximação.

¹Segundo Rabinóvich [56] o coeficiente de viscosidade cinemática da água pode ser dado pela seguinte expressão:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} 10^{-4} \quad (\text{B.7})$$

Onde,

ν - coeficiente de viscosidade cinemática da água, $\frac{m^2}{s}$

T - temperatura da água, $^{\circ}C$.

De acordo com Julien [35] a velocidade de arrastamento é obtida pela seguinte expressão :

$$u_* = \sqrt{gR_h S_f} \quad (\text{B.10})$$

Onde,

g - aceleração da gravidade.

R_h - raio hidráulico.

S_f - inclinação da linha de energia que no caso do escoamento em superfície livre em regime uniforme é igual à declividade do canal.

Este autor refere que o rendimento de uma lagoa de sedimentação é função dos seguintes parâmetros:

$$\eta = f_1 \left(\frac{\omega}{U}, \frac{BL}{hb}, \frac{D^{\frac{1}{6}}}{n\sqrt{g}} \right) \quad (\text{B.11})$$

Onde,

B - largura da lagoa.

b - largura do canal de aproximação.

h - altura do escoamento no canal de aproximação.

n - número de Manning da lagoa.

g - aceleração da gravidade.

Para valores de $\left(\frac{\omega}{u_*}\right) < 2,5$ o rendimento da lagoa de sedimentação é dado por :

$$\eta = 11,7 \left(\frac{\omega}{U}\right)^{0,81} \left(\frac{BL}{hb}\right)^{0,23} \left(\frac{D^{\frac{1}{6}}}{n\sqrt{g}}\right)^{0,98} \quad (\text{B.12})$$

Foram previstos valores de eficiência de remoção com um máximo de ($\pm 25\%$) de erro. Raju *et al.* observaram que se a descarga de fundo da lagoa estiver a funcionar obtém-se um melhor remoção de sedimentos, a eficiência considerando a descarga de fundo é função dos seguintes factores:

$$\frac{\eta_f}{\eta} = f_2 \left(Q_f, \frac{\omega}{u_*} \right) \quad (\text{B.13})$$

Onde,

η_f - rendimento da lagoa com a descarga de fundo aberta.

Q_f - descarga de fundo expresso em percentagem do caudal de entrada na lagoa.

ω - velocidade de sedimentação da partícula.

u_* - velocidade de arrastamento do canal de aproximação.

Esta experiência foi realizada para diferentes tempos de descarga. Face ao exposto a expressão que dá o rendimento com descarga de fundo é a seguinte :

$$\frac{\eta_f}{\eta} = 1 + 0,015 Q_f^{0,83} \left(\frac{\omega}{u_*}\right)^{-0,57} \quad (\text{B.14})$$

Caso o caudal $Q_f = 0$ então $\eta_f = \eta$. Foram previstos valores com um erro máximo de ($\pm 8\%$)

A melhoria da eficiência com a descarga de fundo a funcionar não é muito significativa. Chegou-se a melhorias de 15% em determinadas condições.

Para condições de descarga de fundo contínua a eficiência (η_d) diminui face à situação sem

descarga de fundo (η). A expressão que nos dá o rendimento da lagoa para a condição de descarga de fundo contínua é a seguinte :

$$\frac{\eta_d}{\eta} = 1 - 0,12Q_f^{-0,105} \left(\frac{\omega}{u_*} \right)^{0,312} \quad (\text{B.15})$$

Foram previstos valores com um erro máximo de ($\pm 20\%$).

B.3 Metodologia para o dimensionamento de lagoas de sedimentação

Valiron [70] sugere a seguinte metodologia para o dimensionamento de lagoas de sedimentação.

- Determinar os diâmetros e a distribuição em volume das partículas contido no escoamento pluvial.
- Fixar para cada diâmetro a proporção de partículas que deverá sedimentar para garantir uma determinada qualidade da água.
- Estabelecer uma estimativa preliminar do valor máximo possível da carga hidráulica ($\frac{Q}{A}$).
- Estimar a velocidade de sedimentação para todos os diâmetros.
- Calcular o valor de (R_d) para todos os diâmetros de partículas representativos.
- Ponderar a eficácia global ponderando os resultados obtidos no ponto anterior em função da distribuição de diâmetros de partículas.
- Se a eficácia global não é suficiente, recomeçar o cálculo de um valor de ($\frac{Q}{A}$) mais baixo.
- Logo que a eficácia global é satisfeita, determinar a superfície e a configuração da lagoa de sedimentação.

Valiron [70] refere que podemos atingir bons resultados se as seguintes condições forem satisfeitas:

- Condições geométricas adequadas.
- Conveniente Dissipação de energia à entrada da lagoa.
- Bom conhecimento da relação granulometria/poluentes.
- Calibração do modelo.

Apêndice C

Modelação da poluição difusa - anexos

Tabela C.1: Taxa de transporte de poluentes (c) [74]

Poluente	Residências ($\frac{1}{mm}$)	Auto-estrada ($\frac{1}{mm}$)	Comercial ($\frac{1}{mm}$)	Apartamentos ($\frac{1}{mm}$)
N_T	0,1114	0,0882	0,1035	0,0815
P_T	0,1039	0,0906	0,1079	0,0654
C_T	0,0945	0,1031	0,0961	0,0756
CQO	0,1008	0,1071	0,1110	0,0913
SS	0,1028	0,0831	0,1079	0,1169
Pb_T	—	0,0854	0,1161	0,0831
Taxa média	0,1028	0,0925	0,1071	0,0858
Área total (m^2)	165 109	235 928	82 554	59 488
Área impermeável (m^2)	9 712	42 491	80 936	26 304
t_c (min.)	110	13	7	4

Tabela C.2: Factores de cultivo mais comuns em Portugal, Tomás (1993) *in* Pimenta (1998).

Coberto Vegetal	Factor C
Ocupação Urbana	0,01
Inculto	0,02
Arvoredo frutífero misto	0,05
Pomar	0,05
Vinha	0,10
Vinha + Arvoredo frutífero misto	0,05
Vinha + Pomar	0,05
Vinha + Olival	0,10
Vinha + Culturas arvenses de sequeiro	0,20
Olival	0,10
Culturas de regadio	0,20
Culturas arvenses de sequeiro	0,40
Montado de sobreiro/azinho	0,10
Mato	0,02
Pinheiro bravo + mato	0,02
Eucalipto	0,20
Resinosas	0,05
Povoamento florestal misto	0,05

Tabela C.3: Factores de técnica cultural (C) - Áreas artificiais[49]

Código	Descrição	Factor C
1 -	Áreas artificiais	0,01
1.1 -	Espaço urbano	0,01
1.1.1 -	Tecido urbano contínuo	0,005
1.1.1 -	Tecido urbano descontínuo	0,01
1.1.3 -	Outros espaços fora do tecido urbano consolidado	0,01
1.2 -	Infraestruturas e equipamentos	0,01
1.2.1 -	Zonas industriais e comerciais	0,01
1.2.2 -	Vias de comunicação (Rodoviárias e ferroviárias)	0,01
1.2.3 -	Zonas portuárias	0,01
1.2.4 -	Aeroportos	0,01
1.2.5 -	Equipamentos para desporto e lazer	0,01
1.2.6 -	Outras infraestruturas e equipamentos	0,01
1.3 -	Improdutivos	0,3
1.3.1 -	Pedreiras, saibreiras, minas a céu aberto	0,5
1.3.2 -	lixeiros, descargas industriais e depósitos de sucata	0,1
1.3.3 -	Estaleiros de construção civil	0,01
1.3.4 -	Outras áreas degradadas	0,5
1.4 -	Espaços verdes artificiais	0,02
1.4.1 -	Espaços verdes urbanos (florestais)	0,02
1.4.2 -	Espaços verdes (não florestais) para as actividades desportivas e de lazer	0,02

Tabela C.4: Factores de técnica cultural (C) - terras aráveis (culturas anuais) [49]

Código	Descrição	Factor C
2 -	Áreas Agrícolas	0,3
2.1 -	Terras aráveis - culturas anuais	0,3
2.1.1 -	Sequeiro	0,4
2.1.2 -	Regadio	0,2
2.1.3 -	Arrozais	0,05
2.1.4 -	Outros (estufas, viveiros, etc.)	0,001

Tabela C.5: Factores de técnica cultural (C) - culturas permanentes[49]

Código	Descrição	Factor C
2.2 -	Culturas Permanentes	0,1
2.2.1 -	Vinha	0,2
2.2.1/2 -	Vinha + Pomar	0,15
2.2.1/3 -	Vinha + Olival	0,2
2.2.2 -	Pomar	0,05
2.2.2.1 -	Citrinos	0,05
2.2.2.2 -	Pomoideas	0,05
2.2.2.3 -	Prunoideas (sem a amendoeira)	0,05
2.2.2.4 -	Amendoeiras	0,05
2.2.2.5 -	Figueiras	0,05
2.2.2.6 -	Alfarrobeiras	0,05
2.2.2.7 -	Outros pomares	0,05
2.2.2/x -	Mistos de pomares	0,05
2.2.2/0 -	Pomar + Cultura anual	0,2
2.2.2/1 -	Pomar + Vinha	0,1
2.2.2/3 -	Pomar + Olival	0,1
2.2.2.3 -	Olival	0,1
2.2.3/0 -	Olival + Cultura anual	0,2
2.2.3/1 -	Olival + Vinha	0,1
2.2.3/2 -	Olival + Pomar	0,1
2.2.4 -	Outras arbustivas	0,1
2.2.4.1 -	Medronheiro	0,1
2.2.4.2 -	Outras arbustivas	0,1

Tabela C.6: Factores de técnica cultural (C) - prados permanentes [49]

Código	Descrição	Factor C
2.3 -	Prados permanentes	0,02
2.3.1 -	Prados e lameiros	0,02

Tabela C.7: Factores de técnica cultural (C) - áreas agrícolas heterogéneas [49]

Código	Descrição	Factor C
2.4 -	Áreas agrícolas heterogéneas	0,3
2.4.1 -	Culturas anuais associadas a culturas permanentes	0,4
2.4.1/1 -	Culturas anuais + Vinha	0,3
2.4.1/2 -	Culturas anuais + Pomar	0,2
2.4.1/3 -	Culturas anuais + Olival	0,2
2.4.2 -	Sistemas culturais e parcelares complexos	0,2
2.4.3 -	Áreas principalmente agrícolas	0,3

Tabela C.8: Factores de técnica cultural (C) - territórios agro-florestais [49]

Código	Designação	Factor C
2.5 -	Territórios agro-florestais	0,3
2.5.1/1-8 -	Culturas anuais + espécie florestal	0,3
2.5.2/1-8 -	Espécie florestal + culturas anuais	0,2

Tabela C.9: factores de técnica cultural (C) - floresta [49]

Código	Designação	Factor C
3 -	Floresta	0,1
3.1 -	Folhosas	0,1
3.1.1 -	Sobreiro	0,1
3.1.2 -	Azinhreira	0,1
3.1.3 -	Castanheiro bravo	0,1
3.1.4 -	Castanheiro manso	0,1
3.1.5 -	Carvalho	0,1
3.1.6 -	Eucalipto	0,2
3.1.7 -	Outras folhosas	0,1
3.2 -	Resinosas	0,05
3.2.1 -	Pinheiro bravo	0,05
3.2.2 -	Pinheiro manso	0,05
3.2.3 -	Outras resinosas	0,05
3.3 -	povoamento florestal misto (folhosas + resinosas)	0,05

Tabela C.10: Factores de técnica de cultural (C) - meios semi-naturais[49]

Código	Descrição	Factor C
4 -	Meios semi-naturais	0,3
4.1 -	Ocupação arbustiva e herbácea	0,02
4.1.1 -	Pastagens naturais pobres	0,05
4.1.2 -	Vegetação arbustiva baixa - matos	0,02
4.1.3 -	Vegetação esclerofítica - carrascal	0,02
4.1.4 -	Vegetação arbustiva alta e floresta degradada ou de transição	0,1
4.2 -	Áreas descobertas sem ou com pouca vegetação	0,4
4.2.1 -	Praia, dunas, areais e solos sem cobertura vegetal	0,05
4.2.2 -	Rocha nua	0,01
4.3 -	Zonas incendiadas recentemente	0,5

Tabela C.11: Factores de técnica cultural (C) - meios aquáticos [49]

Código	Descrição	Factor C
5 -	Meios aquáticos	0,005
5.1 -	Zonas húmidas continentais	0,005
5.1.1 -	Zonas pantanosas	0,005
5.2 -	Zonas húmidas marítimas	0,005
5.2.1 -	Sapais	0,005
5.2.2 -	Salinas	0,005
5.2.3 -	Zonas intertidais (entre marés)	0,005

Tabela C.12: Factores de técnica cultural (C) - superfícies com água [49]

Código	Descrição	Factor C
6 -	Superfícies com água	0
6.1 -	Áreas continentais	0
6.1.1 -	Cursos de água	0
6.1.2 -	Lagoas e albufeiras	0
6.2 -	Águas marítimas	0
6.2.1 -	Lagunas e cordões litorais	0
6.2.2 -	Estuários	0
6.2.3 -	Mar e oceano	0

Tabela C.13: Factores de prática de conservação do solo (P) [11]

Inclinação do solo (%)	Prática de conservação do solo		
	em curvas de nível	em faixas	em terraços
2 - 7	0,50	0,25	0,10
8 - 12	0,60	0,30	0,12
12 - 18	0,80	0,40	0,16
19 - 24	0,90	0,45	0,18

Apêndice D

Modelação do escoamento - anexos

Tabela D.1: Valores de número de escoamento para zonas rurais [14, 18]

Utilização e Cobertura do Solo	Condições ou Prática	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Solo lavrado	Segundo o maior declive	Pobre	77	86	91	94
Culturas arvenses	Segundo o maior declive	Pobre	72	81	88	91
	Segundo o maior declive	Boa	67	78	85	89
	Segundo as curvas de nível	Pobre	70	79	84	88
	Segundo as curvas de nível	Boa	65	75	82	86
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Pobre	66	74	80	82
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Boa	62	71	78	81
Cereais	Segundo o maior declive	Pobre	65	76	84	88
	Segundo o maior declive	Boa	63	75	83	87
	Segundo as curvas de nível	Pobre	63	74	82	85
	Segundo as curvas de nível	Boa	61	73	81	84
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Pobre	61	72	79	82
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Boa	59	70	78	81
Sementeira recente de legumes ou rotação de culturas	Segundo o maior declive	Pobre	66	77	85	89
	Segundo o maior declive	Boa	58	72	81	85
	Segundo as curvas de nível	Pobre	64	75	83	85
	Segundo as curvas de nível	Boa	55	69	78	83
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Pobre	63	73	80	83
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Boa	51	67	76	80
Pastagens	—	Pobre	68	79	86	89
	—	Razoável	49	69	79	84
	—	Boa	39	61	74	80
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Pobre	47	67	81	88
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Razoável	25	59	75	83
	Segundo as curvas de nível e em terraços	Boa	6	35	70	79
Prado Permanente	—	Boa	30	58	71	78
Florestas	—	Pobre	45	66	77	83
	—	Razoável	36	60	73	79
	—	Boa	25	55	70	77
	Muito abertas ou de baixa transpiração	—	56	75	86	91
	Abertas ou de baixa transpiração	—	46	68	78	84
	Normal	—	36	60	70	76
	Densas ou de alta transpiração	—	26	52	62	69
	Muito densas ou de alta transpiração	—	15	44	54	61
Zonas sociais rurais	—	—	59	74	82	86
Estradas	Superfície permeável	—	72	82	87	89
	Superfície impermeável	—	74	84	90	92

Tabela D.2: Valores de número de escoamento para zonas urbanas [18]

Utilização ou cobertura do solo	Condições ou prática	A	B	C	D
Zona cultivada	Sem medidas de conservação do solo	72	81	88	91
	Com medidas de conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens e baldios	Em más condições	68	79	86	89
	Em boas condições	39	61	74	80
Prado	Em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	Com má cobertura morta do solo	45	66	77	83
	Com boa cobertura morta do solo	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campo de golfe, cemitérios, etc.	Boas condições : relva cobrindo 75% da área.	39	61	74	80
	Condições razoáveis : relva cobrindo de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e escritório	Com 85% de área impermeável	89	92	94	95
Zonas industriais	Com 72% de área impermeável	81	88	91	93
Zonas Residenciais (Área média dos lotes)	(Percentagem de zona impermeável)				
< 500m ²	65%	77	85	90	92
1000m ²	38%	61	75	83	87
1300m ²	30%	57	72	81	86
2000m ²	25%	54	70	80	85
4000m ²	20%	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	—	98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
	Gravilha	76	85	89	91
	Terra	72	82	87	89

Apêndice E

Modelo físico de transporte de poluentes

Parr [48] propõe um modelo físico que nos quantifica a massa de poluentes dissolvidos que passa do solo para a coluna de água.

A equação unidimensional para a convecção dispersão de substâncias dissolvidas é a seguinte :

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v_1 \frac{\partial c}{\partial z} \quad (\text{E.1})$$

Onde,

c - concentração do soluto, $\frac{mg}{L}$.

t - tempo, s.

z - distância na camada de solo, m.

D - coeficiente de dispersão, $\frac{m^2}{s}$.

v_1 - velocidade da água nos poros, $\frac{m}{s}$.

R - coeficiente de retardamento.

A velocidade da água nos poros é dada pela seguinte relação :

$$v_1 = \frac{I}{\theta} \quad (\text{E.2})$$

Onde,

I - taxa de infiltração, $\frac{m}{s}$.

θ - grau de humidade do solo, $\frac{m^3}{m^3}$.

O coeficiente de retardamento (R) é dado pela seguinte expressão :

$$R = 1 + \frac{\theta}{\rho_b K_d} \quad (\text{E.3})$$

Onde,

ρ_b - massa volúmica do solo, $\frac{kg}{m^3}$.

K_d - coeficiente de distribuição.

A equação (E.1) é resolvida para uma camada de solo semi-infinita ($z > 0$), inicialmente saturada com um poluente conservativo de concentração inicial (C_0). Isto é :

$$\frac{\partial c}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (\text{E.4})$$

$$c(z, 0) = C_0 \quad (\text{E.5})$$

A concentração do poluente ao longo da camada de solo é dada pela seguinte expressão :

$$\begin{aligned} c(z, t) = C_0 & \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rz - v_1 t}{2\sqrt{DRt}} \right] - \dots \right. \\ & \dots - \frac{v_1 + E}{2E} \exp \left(\frac{v_1 z}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{Rz + v_1 t}{2\sqrt{DRt}} \right] + \dots \\ & \left. \dots + \left(1 + \frac{v_1}{E} \right) \exp \left[\frac{(E + v_1)(Rz + Et)}{DR} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{Rz + (2E + v_1)t}{2\sqrt{DRt}} \right] \right] \end{aligned} \quad (\text{E.6})$$

Onde,

E - coeficiente de arrastamento, $\frac{m^2}{s}$.

O coeficiente de dispersão (D) é obtido da seguinte forma :

$$\frac{D}{D_0} = aP_*^2 \quad (\text{E.7})$$

Onde,

D_0 - coeficiente de difusão molecular do poluente, $\frac{m^2}{s}$.

a - parâmetro que depende das características do solo.

P_* - número de Peclet.

O número de Peclet P_* é dado pela seguinte expressão:

$$P_* = \frac{v}{D_0} \sqrt{\frac{fk}{8}} \quad (\text{E.8})$$

Onde,

v - velocidade de escoamento, $\frac{m}{s}$.

f - factor de resistência de Darcy-Weisbach.

k - coeficiente de permeabilidade intrínseca do solo, m^2 .

O coeficiente de arrastamento é dado pela seguinte expressão :

$$E \approx b_1 \sqrt{D} \quad (\text{E.9})$$

Na qual (b_1) assume o valor de 0,8 para quando o coeficiente de arrastamento (E) é expresso em $(\frac{cm}{min})$ e o coeficiente de difusão é expresso em $(\frac{cm^2}{min})$.

Para ($z = 0$) a equação toma a seguinte configuração :

$$\begin{aligned} c(0, t) = C_0 & \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{-v_1 t}{2\sqrt{DRt}} \right] - \dots \right. \\ & \dots - \frac{v_1 + E}{2E} \operatorname{erfc} \left[\frac{v_1 t}{2\sqrt{DRt}} \right] + \dots \\ & \left. \dots + \left(1 + \frac{v_1}{E} \right) \exp \left[\frac{(E + v_1)Et}{DR} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{(2E + v_1)t}{2\sqrt{DRt}} \right] \right] \end{aligned} \quad (\text{E.10})$$

A taxa que o soluto que sai do solo por unidade de área é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{dM}{dt} = D \frac{\partial c}{\partial z} = (v_1 + E)c \quad (\text{E.11})$$

Substituindo a equação (E.10) em (E.11) e integrando obtêm-se :

$$\begin{aligned}
 M_t &= \frac{C_0 DR(2E + v_1)}{2E^2} \left[\exp \left[\frac{(E + v_1)Et}{DR} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{(2E + v_1)\sqrt{t}}{2\sqrt{DR}} \right] + \dots \right. \\
 &\dots + \left. \frac{2E + v_1}{v_1} \operatorname{erf} \left[\frac{v_1\sqrt{t}}{2\sqrt{DR}} \right] - 1 \right] - \frac{4DRC_0(E + v_1)}{Ev_1} P(s)
 \end{aligned} \tag{E.12}$$

Onde,

$$P(s) = \int_0^s \theta \operatorname{erfc}(\theta) d\theta \tag{E.13}$$

e,

$$s = \frac{v_1\sqrt{t}}{2\sqrt{DR}} \tag{E.14}$$

Por unidade de comprimento e de largura B, o total de poluente perdido para o tempo (t) é dado por :

$$M_t(t) = \int_0^B M_t dy \tag{E.15}$$

Apêndice F

Modelo físico de transporte de sedimentos

A determinação do transporte de sedimentos pode ser utilizada uma abordagem física de fácil aplicação prática. Considerando a metodologia proposta por Hjelmfelt [32]

$$\frac{\partial(h \cdot s)}{\partial t} \cdot \partial^2 = W_s - Q_{out} \cdot s + (E_I + E_R) \cdot \partial^2 \quad (F.1)$$

Onde,

∂ - largura da célula, m.

h - altura do escoamento, m.

s - concentração de sedimentos, $\frac{kg}{m^3}$.

t - tempo, h.

W_s - massa de sedimentos que entra na célula, kg.

Q_{out} - caudal que sai da célula, $\frac{m^3}{h}$.

E_I - erosão entre linhas de água, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$.

E_R - erosão nas linhas de água, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$.

Os valores relativos a (E_I) são sempre positivos, relativamente a (E_R) , são positivos aquando de erosão e negativos para a deposição.

A determinação da erosão entre linhas de água, (E_I) , é inspirada na equação universal da perda de solo (USLE) e foi proposta pela primeira vez por Foster (1982), onde a erosão entre as linhas de água é proporcional ao quadrado da intensidade pluviométrica.

$$E_I = 0,0138 \cdot K \cdot C \cdot r^2 \quad (F.2)$$

Onde,

E_I - erosão entre linhas de água, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$.

K - coeficiente de erodibilidade do solo (USLE), $\frac{kg \cdot h}{N \cdot m^2}$.

C - coeficiente de técnica de cultivo (USLE).

r - intensidade de precipitação, $\frac{mm}{h}$.

A capacidade de transporte nas linhas de água é proporcional (E_R) à diferença entre a capacidade de transporte de sedimentos e a capacidade de carga de sedimentos (Foster e Meyer *in* Hjelmfelt [32], Foster *et al. in* WEPP [76]).

Para $E_R \geq 0$:

$$E_R = \frac{D_c}{T_c} \cdot (T_c - q \cdot s) \quad (F.3)$$

Para $E_R < 0$:

$$E_R = \Theta \frac{V_s}{q} \cdot (T_c - q \cdot s) \quad (F.4)$$

Onde,

D_c - capacidade arrastamento nas linhas de água, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$.

T_c - capacidade de transporte do escoamento, $\frac{kg}{m \cdot h}$.

q - caudal por unidade de largura, $\frac{m^3}{m \cdot h}$.

s - concentração de sedimentos, $\frac{kg}{m^3}$.

Θ - parâmetro, 0,5 para escoamento difuso, 1,0 para escoamento em canal.

V_s - velocidade de sedimentação das partículas, $\frac{m}{h}$.

Foster (1982) *in* Hjelmfelt [32] apresenta formulações para a determinação de (D_c) e (T_c).

$$D_c = 83,7 \cdot K \cdot C \cdot \tau^{\frac{3}{2}} \quad (F.5)$$

$$T_c = K_T \cdot \tau^{\frac{3}{2}} \quad (F.6)$$

Onde,

D_c - capacidade arrastamento nas linhas de água, $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$.

T_c - capacidade de transporte do escoamento, $\frac{kg}{m \cdot h}$.

K - coeficiente de erodibilidade do solo (USLE), $\frac{kg \cdot h}{N \cdot m^2}$.

C - coeficiente de técnica de cultivo (USLE).

τ - tensão de arrastamento que actua no solo, Pa .

K_T - coeficiente da capacidade de transporte.

Foster *et al.* *in* WEPP [76] determina a (D_c) por outra expressão :

$$D_c = K_r \cdot (\tau - \tau_c) \quad (F.7)$$

Onde,

K_r - parâmetro de erodibilidade em linhas de água.

τ - tensão de arrastamento do escoamento, Pa .

τ_c - tensão crítica de arrastamento, Pa .

Alberts *et al.* *in* WEPP [76] determina a tensão crítica de arrastamento de sedimentos pela seguinte expressão :

$$\tau_c = 3,23 - 5,6 \cdot areia - 24,4 \cdot mo + \frac{0,9 \cdot \rho_d}{1000} \quad (F.8)$$

Onde,

areia - fracção de areia no solo ($0 \cdots 1$).

mo - fracção de matéria orgânica no solo ($0 \cdots 1$).

ρ_d - massa volúmica do solo, $\frac{kg}{m^3}$.

Alberts *et al.* *in* WEPP [76] determina a parâmetro de erodibilidade em linhas de água pela seguinte expressão :

$$K_r = 0,0017 + 0,0024 \cdot argila - 0,0088 \cdot mo - \frac{0,00088 \cdot \rho_d}{1000} - 0,00048 \cdot raizes10 \quad (F.9)$$

Onde,

argila - fracção de argila no solo ($0 \cdots 1$).

areia - fracção de areia no solo ($0 \cdots 1$).

mo - fracção de matéria orgânica no solo ($0 \cdots 1$).

ρ_d - massa volúmica do solo, $\frac{kg}{m^3}$.

$raizes10$ - massa de raízes nos primeiros 10 cm de solo, $\frac{kg}{m^2}$.

De acordo com Alberts *et al. in* WEPP [76] os valores de argila, areia, mo e raízes variam dentro dos seguintes valores :

- $argila$ - 0,033 a 0,422
- $areia$ - 0,005 a 0,112
- $raizes10$ - 0,02 a 4,10 $\frac{kg}{m^3}$
- ρ_d - 1200 a 1800 $\frac{kg}{m^3}$

A tensão de arrastamento que se faz sentir no solo devido ao escoamento é dada por :

$$\tau = \gamma \cdot h_s \cdot S_f \quad (F.10)$$

Onde,

τ - tensão de arrastamento do solo, Pa .

h_s - porção da carga hidráulica que actua sobre os sedimentos, m .

S_f - inclinação da linha de energia, $\frac{m}{m}$.

γ - peso volúmico da água, $\frac{N}{m^3}$.

$$S_f \approx \sin(\alpha) \quad (F.11)$$

Onde,

S_f - inclinação da linha de energia, $\frac{m}{m}$.

α - inclinação do solo, $graus$.

O valor de h_s é dado por Foster (1982) *in* Hjelmfelt [32] :

$$h_s = h \cdot \frac{n_s}{n} \quad (F.12)$$

Onde,

n - coeficiente de Manning para solo liso.

n_s - coeficiente de Manning para solo com a cobertura natural.

h - altura de escoamento, m .

Apêndice G

Modelo de onda cinemática

G.1 Apresentação do modelo

a metodologia proposta para a resolução do modelo de onda cinemática é a proposta por Chow [15]. A equação da continuidade é dada pela seguinte expressão :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (\text{G.1})$$

Onde,

Q - caudal, $\frac{m^3}{s}$.

x - espaço, m .

t - tempo, t .

A - Área da secção molhada, m^2 .

q - entrada lateral de caudal, $\frac{m^3}{m \cdot s}$.

Considerando que $S_0 = S_f^1$ podemos escrever A da seguinte forma :

$$A = \alpha \cdot Q^\beta \quad (\text{G.2})$$

Considerando a equação de Gauckler-Manning Strickler.

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot j^{\frac{1}{2}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Q &= \frac{1}{n} \cdot A \left[\frac{A}{P} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{j} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Q &= \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{j} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow A &= \left[\frac{P^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{j}} \cdot n \right]^{\frac{3}{5}} \cdot Q^{\frac{3}{5}} \end{aligned} \quad (\text{G.3})$$

Os valores de α e β são respectivamente :

$$\alpha = \left[\frac{P^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{j}} \cdot n \right]^{\frac{3}{5}} \quad (\text{G.4})$$

$$\beta = \frac{3}{5} \quad (\text{G.5})$$

¹ S_0 - inclinação do talvegue.
 S_f - inclinação da linha de energia.

Considerando α e β a equação que traduz o escoamento é dado por :

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \alpha \cdot Q^\beta}{\partial t} &= q \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} &= q \end{aligned} \quad (G.6)$$

G.2 Resolução numérica

G.2.1 Esquema linear da equação de onda cinemática

Para a resolução da equação diferencial que nos dá o movimento consideramos que :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (G.7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (G.8)$$

$$Q \approx \frac{Q_i^{j+1} + Q_i^j}{2} \quad (G.9)$$

$$q \approx \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (G.10)$$

Substituindo os termos na equação da continuidade :

$$\begin{aligned} \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \cdot \left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \right) &= \dots \\ \dots &= \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \end{aligned} \quad (G.11)$$

Resolvendo a equação em relação ao termo (Q_{i+1}^{j+1}) , obtemos :

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_i^{j+1} + \alpha \cdot \beta \cdot Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \cdot \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2}}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1}} \quad (G.12)$$

Na figura (G.1)(pag. 135) podemos ver o esquema esquematizado.

G.2.2 Esquema não linear da equação de onda cinemática

A equação geral pode ser apresentada da seguinte forma :

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_{i+1}^j}{\Delta t} = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (G.13)$$

Onde,

$$A_{i+1}^{j+1} = \alpha \cdot (Q_{i+1}^{j+1})^\beta \quad (G.14)$$

e

$$A_{i+1}^j = \alpha \cdot (Q_{i+1}^j)^\beta \quad (G.15)$$

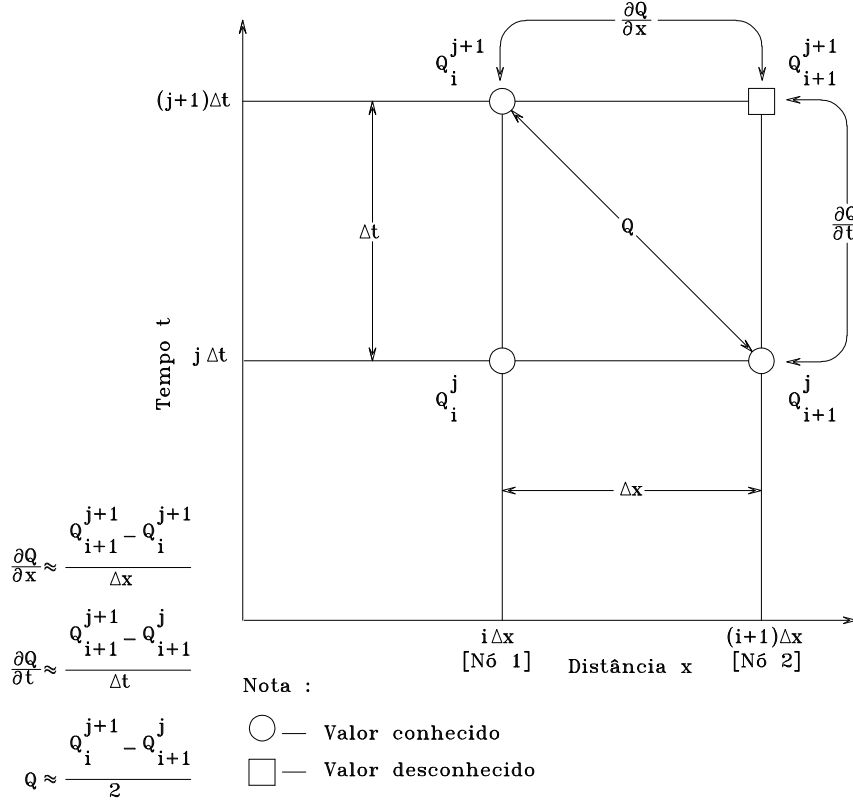


Figura G.1: Esquema linear para a resolução do modelo de onda cinemática, adaptado de Chow [15]

Substituindo as expressões, obtemos :

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_{i+1}^{j+1} + \alpha \cdot (Q_{i+1}^{j+1})^\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_i^{j+1} + \alpha \cdot (Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \cdot \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (\text{G.16})$$

Se considerarmos :

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_i^{j+1} + \alpha \cdot (Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \cdot \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (\text{G.17})$$

Se considerarmos o erro residual $f(Q_{i+1}^{j+1})$.

$$f(Q_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot Q_{i+1}^{j+1} + \alpha \cdot (Q_{i+1}^{j+1})^\beta - C \quad (\text{G.18})$$

A primeira derivada de $f(Q_{i+1}^{j+1})$ é definida por :

$$f'(Q_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot (Q_{i+1}^{j+1})^{\beta-1} \quad (\text{G.19})$$

O objectivo é determinar Q_{i+1}^{j+1} por forma a que $f(Q_{i+1}^{j+1}) = 0$. Utilizando o método de Newton, para iterações $k = 1, \dots, n$.

$$(Q_{i+1}^{j+1})_{k+1} = (Q_{i+1}^{j+1})_k - \frac{f(Q_{i+1}^{j+1})_k}{f'(Q_{i+1}^{j+1})_k} \quad (\text{G.20})$$

O critério de convergência é dado por :

$$|(Q_{i+1}^{j+1})_{k+1}| \leq \epsilon \quad (\text{G.21})$$

A obtenção do valor de Q_{i+1}^{j+1} na primeira iteração, Chow [15] refere que pode-se utilizar o esquema linear, sendo as seguintes iterações realizadas com o esquema não linear.

É referido por Chow [15] que o esquema não linear é incondicionalmente estável, este autor também refere que para uma gama variada de $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ a forma do hidrograma não afectada significativamente.

G.3 Aplicação do modelo a uma bacia hidrográfica

A aplicação desta metodologia a uma bacia hidrográfica pressupõe conhecer toda a rede de troços de linhas de água. Esta pode ser obtida pela metodologia proposta no capítulo (4) (pag. 57).

Para se garantir a conservação da massa em toda a bacia hidrográfica, tem de ser considerada a interacção do troço em estudo com os troços de montante afluentes, devendo-se assim considerar os seguintes pontos :

- O calculo deverá ser realizado dos troços de ordem (1) para os de ordem (n).
- Em cada Δt , o caudal de entrada no (nó 1) do troço em estudo no tempo (j+1), (Q_i^{j+1}) , corresponde ao somatório dos caudais nos (nós 2) dos troços afluentes obtidos no tempo (j+1) do Δt em estudo.
- Em cada Δt , o caudal no (nó 2) para o tempo (j), (Q_{i+1}^j) , é igual a (Q_{i+1}^{j+1}) do troço em estudo no Δt anterior.

A bibliografia consultada [15, 64] refere que o escoamento pode ser considerado uniforme em toda a largura da célula. Testes efectuados após o desenvolvimento do modelo de onda cinemática, verificou-se que o tempo de concentração determinado para a bacia hidrográfica é bastante superior ao estimado através de expressões empíricas.

A razão desta diferença foi atribuída ao facto de raio hidráulico do escoamento modelado ² ser muito inferior ao real ³. Pela análise da equação de Gauckler-Manning-Strickler utilizada neste modelo concluímos que quanto menor o raio hidráulico menor a velocidade de escoamento. A forma de resolver este problema é o desenvolvimento do modelo com base em secções com as características reais.

Conseguir uma velocidade de escoamento o mais próximo possível do real é importante para a modelação do transporte de sedimentos e poluentes.

²Secção rectangular com a largura da célula

³Secção com configuração triangular nas linhas de água de primeira ordem e trapezoidal nas restantes. Podendo variar a largura entre alguns centímetros nas linhas de primeira ordem e atingir alguns metros junto à foz.

Apêndice H

Ribeira da Meia Légua - dados

Tabela H.1: Aac - aluviosolos modernos calcários de textura pesada.
Adaptado de Kopp [36] e Cardoso[12]

Parâmetro	Kopp (1989)	Cardoso (1965)
Argila (%)	46	24,7
Limo (%)	23	33,1
Areia fina (%)	18	37,6
Areia grossa (%)	13	4,6
Matéria orgânica (%)	1,4	1,52
Classe de Estrutura	2	2
Classe de Permeabilidade	4	3
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,027	0,064
Tipo de solo (SCS)	D	C

Tabela H.2: Ass - solos salinos de salinidade elevada de aluviões de textura mediana. Adaptado de Kopp [36] e Cardoso[12]

Parâmetro	Kopp (1989)	Cardoso (1965)
Argila (%)	28	33,0
Limo (%)	61	44,8
Areia fina (%)	10	21,4
Areia grossa (%)	1	0,8
Matéria orgânica (%)	2,7	5,44
Classe de Estrutura	0	0
Classe de Permeabilidade	5	5
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,052	0,031
Tipo de solo (SCS)	D	C

Tabela H.3: Et - litossolos esqueléticos de arenitos. Adaptado de Cardoso[12]

Parâmetro	Cardoso (1965)
Argila (%)	6,2
Limo (%)	5,6
Areia fina (%)	51,9
Areia grossa (%)	36,3
Matéria orgânica (%)	3,14
Estrutura	3
Permeabilidade	1
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,053
Tipo de solo (SCS)	A

Tabela H.4: Pc - solos calcários pardos de calcários não compactos. Adaptado de Kopp [36] e Cardoso[12]

Parâmetro	Kopp (1989)	Cardoso (1965)	Cardoso (1965)
Argila (%)	25	17,1	24,8
Limo (%)	20	15,1	35,5
Areia fina (%)	49	60,6	25,2
Areia grossa (%)	6	7,2	14,5
Matéria orgânica (%)	1,6	1,41	2,62
Estrutura	2	2	2
Permeabilidade	3	2	4
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,062	0,075	0,051
Tipo de solo (SCS)	C	B	C

Tabela H.5: Rg - regossolos psamíticos não húmidos. Adaptado de Kopp [36] e Cardoso[12]

Parâmetro	Kopp (1989)	Cardoso (1965)
Argila (%)	4	1,1
Limo (%)	4	0,7
Areia fina (%)	32	7,4
Areia grossa (%)	60	90,8
Matéria orgânica (%)	0,8	1,37
Estrutura	3	3
Permeabilidade	1	1
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,040	0,005
Tipo de solo (SCS)	A	A

Tabela H.6: Rgc - regossolos psamíticos não húmidos cultivados. Adaptado de Cardoso[12]

Parâmetro	Cardoso (1965)
Argila (%)	0,7
Limo (%)	7,0
Areia fina (%)	8,1
Areia grossa (%)	84,2
Matéria orgânica (%)	2,65
Estrutura	1
Permeabilidade	1
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,003
Tipo de solo (SCS)	A

Tabela H.7: Vc - solos calcários vermelhos de climas mediterrânicos de calcários. Adaptado de Kopp [36] e Cardoso[12]

Parâmetro	Kopp (1989)	Cardoso (1965)	Cardoso (1965)
Argila (%)	47	23,0	28,1
Limo (%)	21	24,4	18,4
Areia fina (%)	29	34,6	34,7
Areia grossa (%)	3	18,0	18,8
Matéria orgânica (%)	1,2	1,72	1,72
Estrutura	2,5	2,5	2,5
Permeabilidade	5	3	3
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,039	0,055	0,045
Tipo de solo (SCS)	D	C	C

Tabela H.8: Vcd - solos mediterrâneos vermelhos ou amarelos de calcários compactos ou dolomias. Adaptado de Kopp [36] e Cardoso[12]

Parâmetro	Kopp (1989)	Cardoso (1965)	Cardoso (1965)
Argila (%)	51	41,0	42,7
Limo (%)	8	28,3	30,0
Areia fina (%)	28	22,9	22,1
Areia grossa (%)	13	7,8	5,2
Matéria orgânica (%)	3,4	3,57	6,65
Estrutura	3	3	3
Permeabilidade	5	5	5
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,026	0,038	0,028
Tipo de solo (SCS)	D	D	D

Tabela H.9: Vt - solos litólitos não húmicos de arenitos. Adaptado de Cardoso[12]

Parâmetro	Cardoso (1965)	Cardoso (1965)
Argila (%)	5,5	8,0
Limo (%)	11,6	9,5
Areia fina (%)	49,0	47,5
Areia grossa (%)	33,9	35,0
Matéria orgânica (%)	0,86	0,59
Estrutura	1,5	1,5
Permeabilidade	1	1
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,065	0,060
Tipo de Solo (SCS)	A	A

Tabela H.10: Et - litossolos (solos esqueléticos) de arenitos .Adaptado de Cardoso [12]

Parâmetro	Cardoso (1965)
Argila (%)	6,2
Limo (%)	5,6
Areia fina (%)	51,9
Areia grossa (%)	36,3
Matéria orgânica (%)	3,14
Estrutura	3
Permeabilidade	1
Erosividade do solo ($\frac{t}{ha} \cdot \frac{h}{MJ \cdot mm}$)	0,053
Tipo de Solo (SCS)	A

Apêndice I

Ribeira da Meia Léguas - resultados

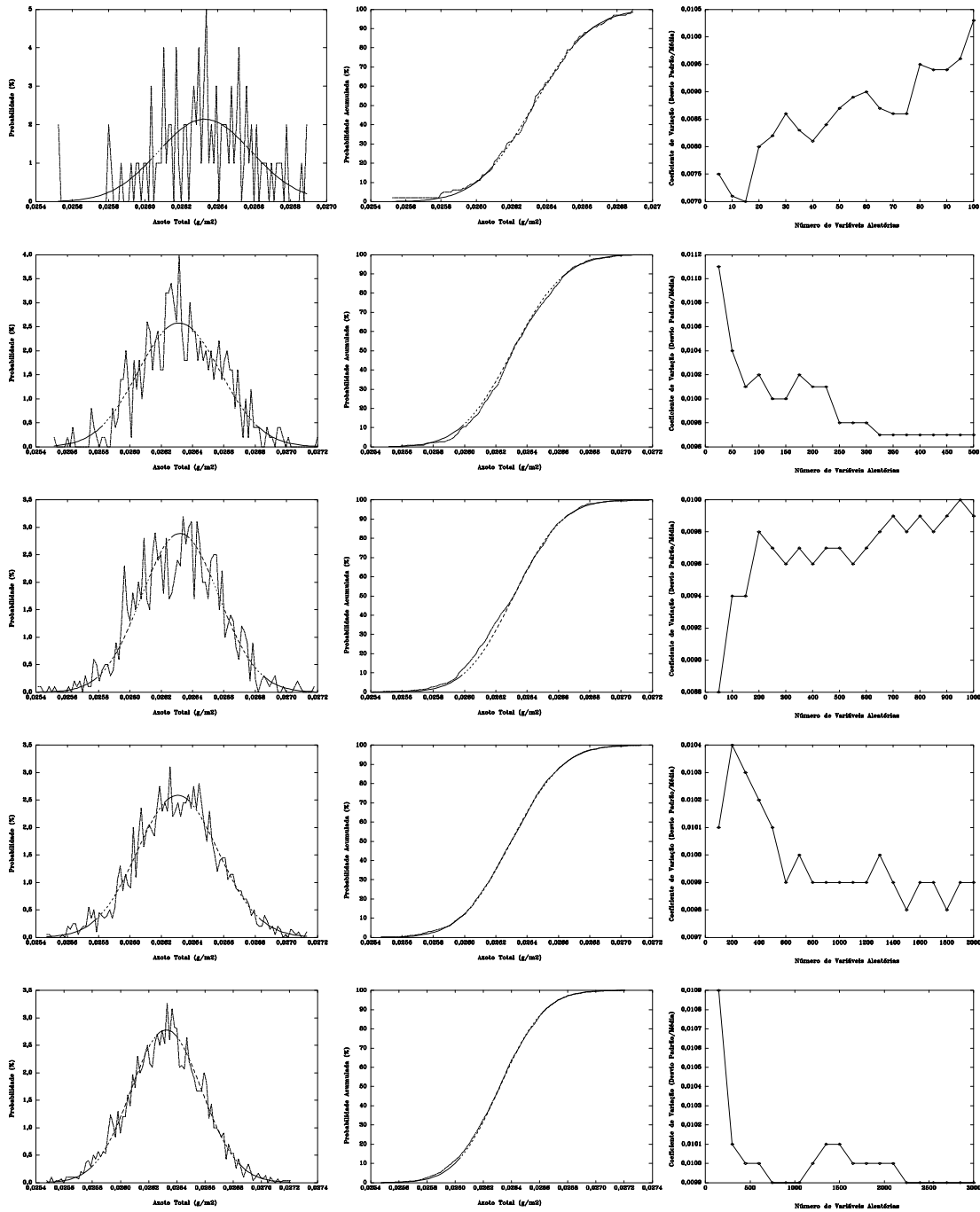


Figura I.1: Simulação dos valores de azoto total pelo método de Monte Carlo para a geração de 100, 500, 1 000, 2 000 e 3 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

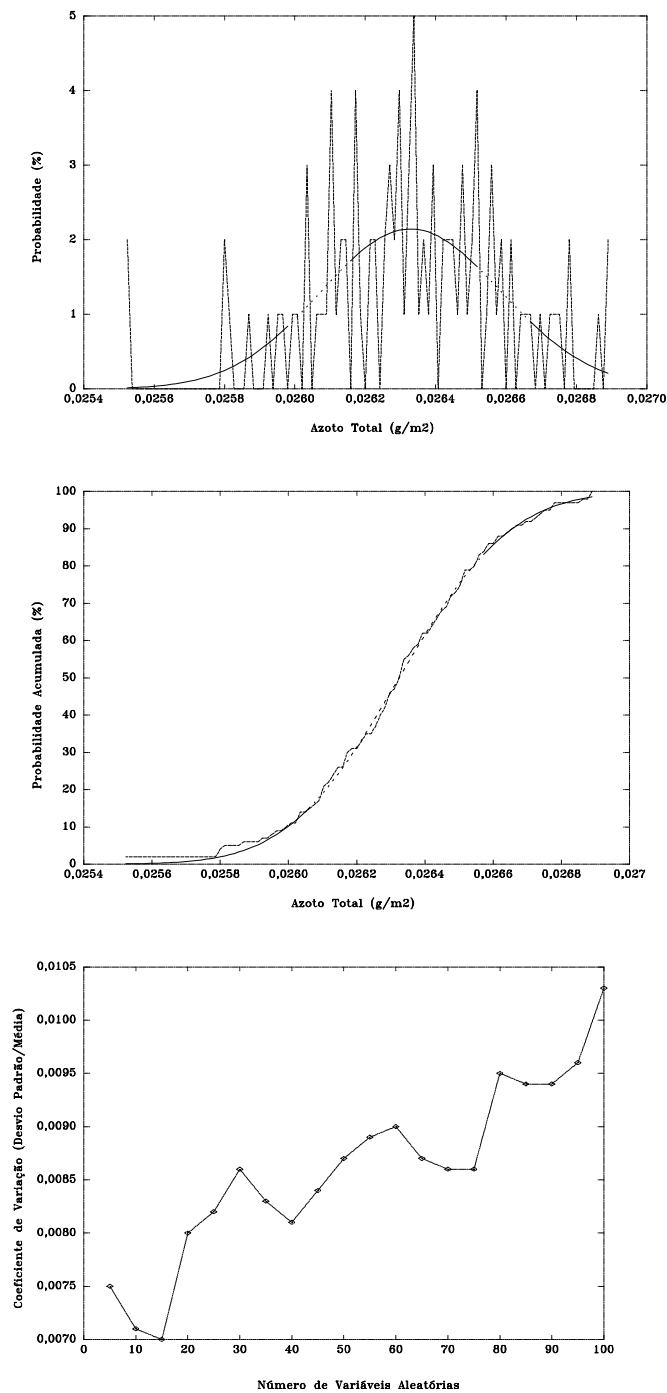


Figura I.2: Simulação do azoto total pelo método de Monte Carlo para a geração de 100 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

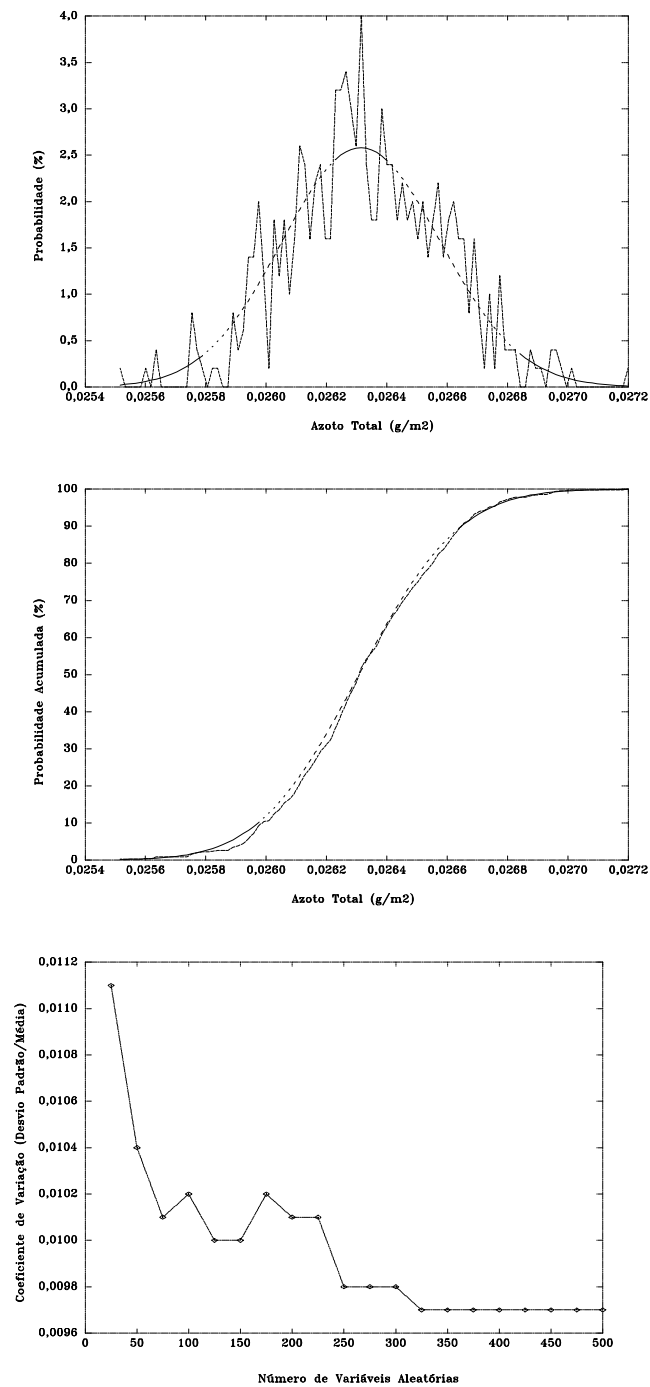


Figura I.3: Simulação do azoto total pelo método de Monte Carlo para a geração de 500 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

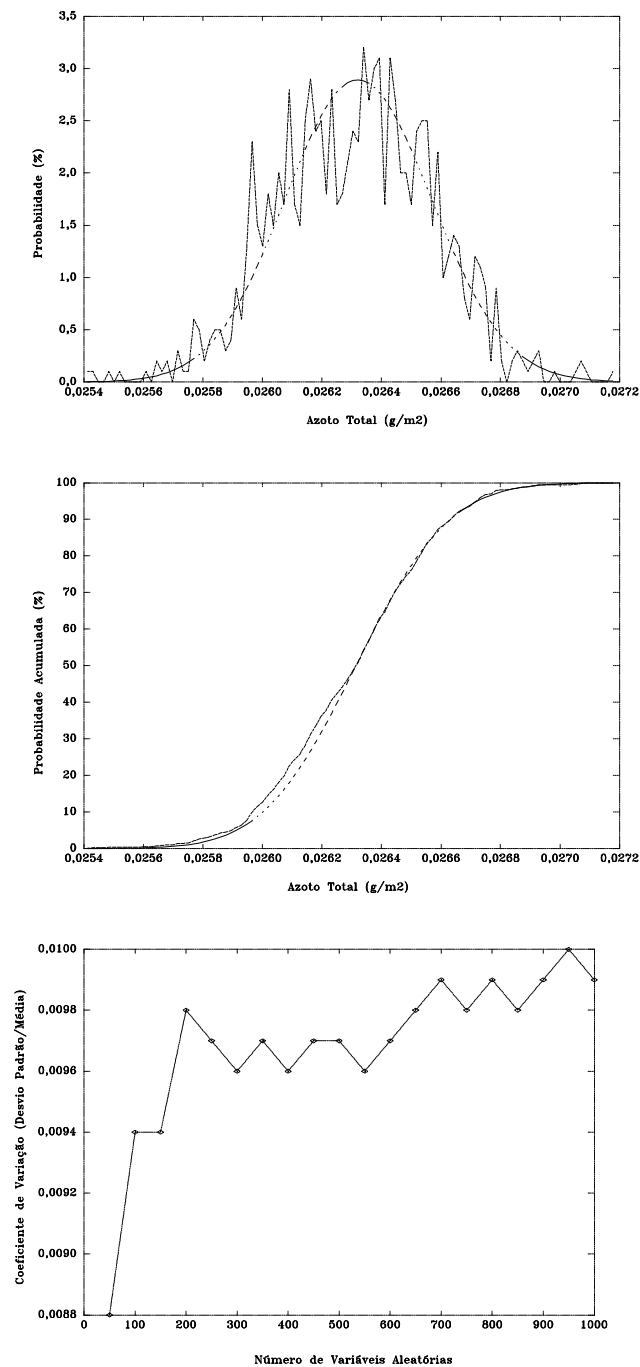


Figura I.4: Simulação de azoto total pelo método de Monte Carlo para a geração de 1 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

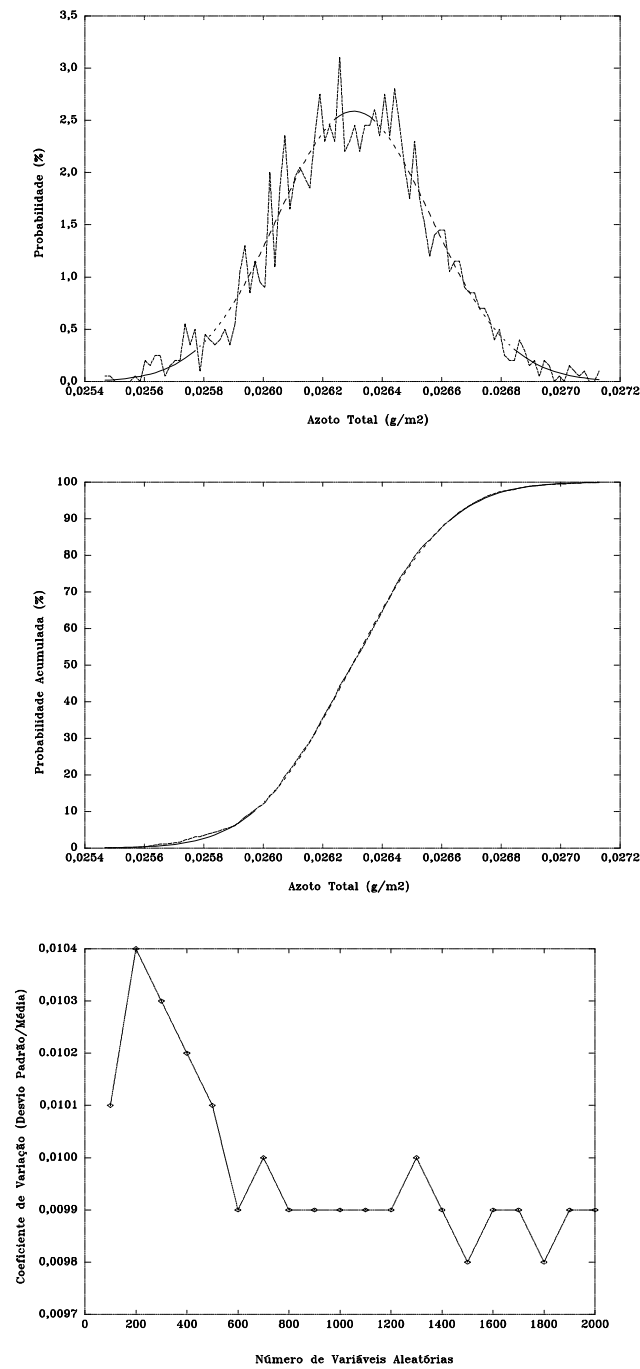


Figura I.5: Simulação do azoto total pelo método de Monte Carlo para a geração de 2 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

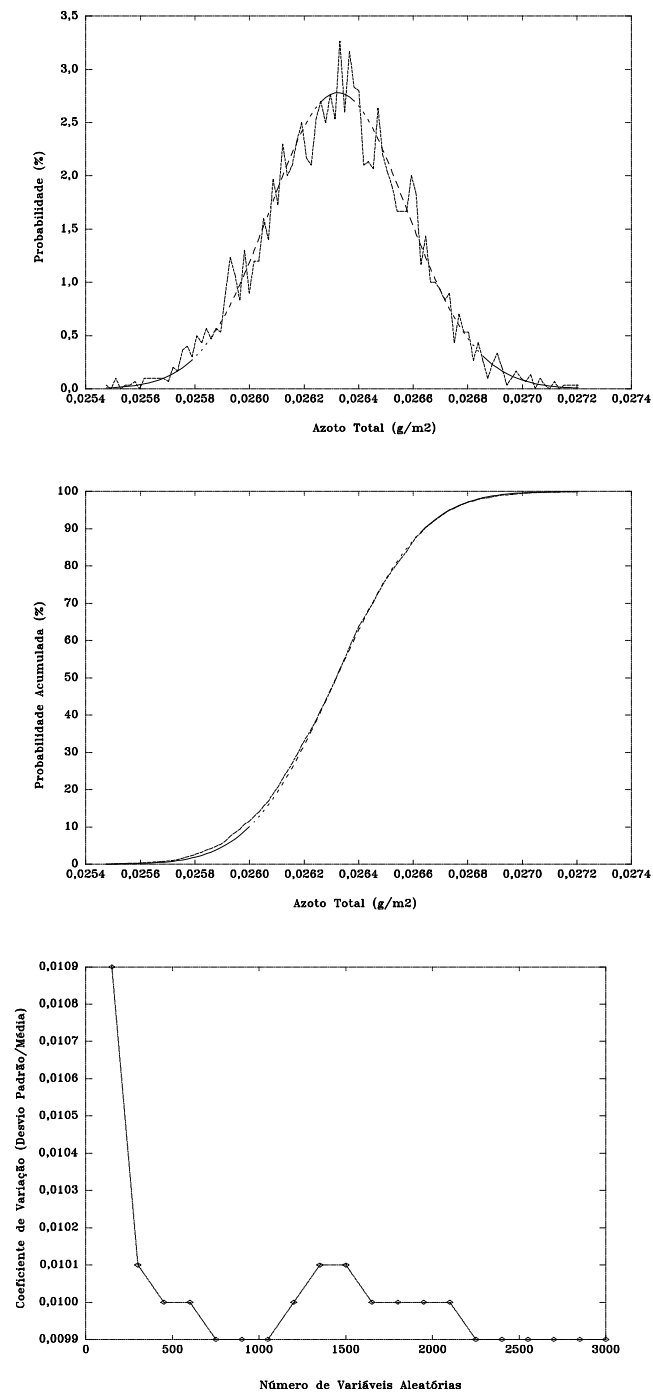


Figura I.6: Simulação de azoto total pelo método de Monte Carlo para a geração de 3 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

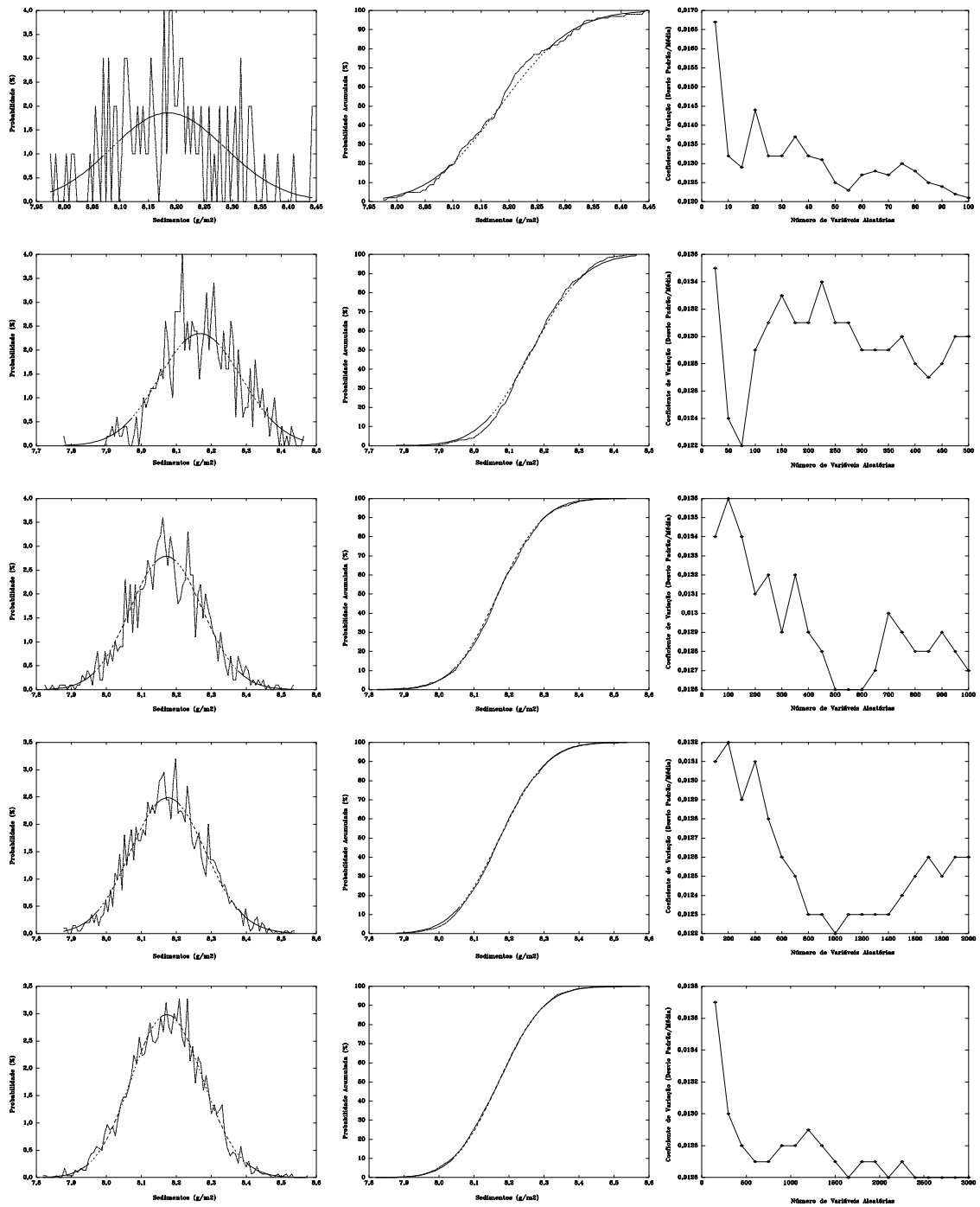


Figura I.7: Simulação dos sedimentos pelo método de Monte Carlo para a geração de 100, 500, 1 000, 2 000 e 3 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

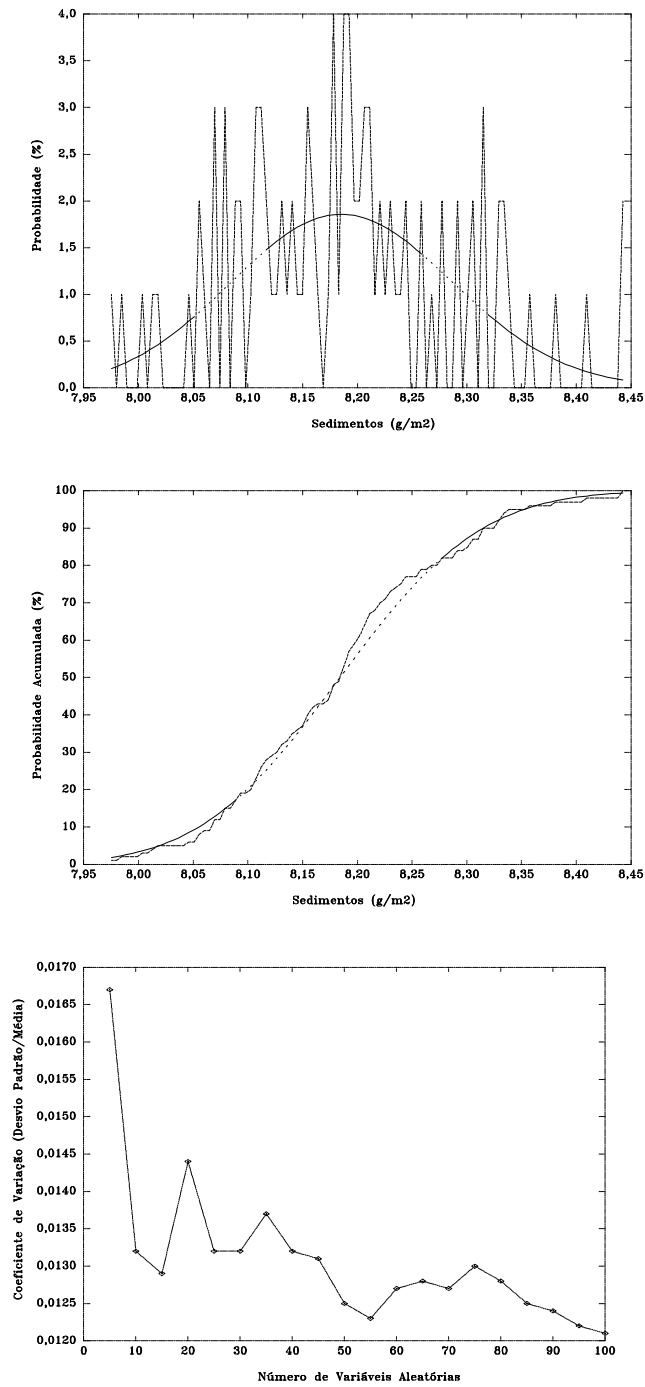


Figura I.8: Simulação dos sedimentos pelo método de Monte Carlo para a geração de 100 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII e condição de humidade do solo AMCII.

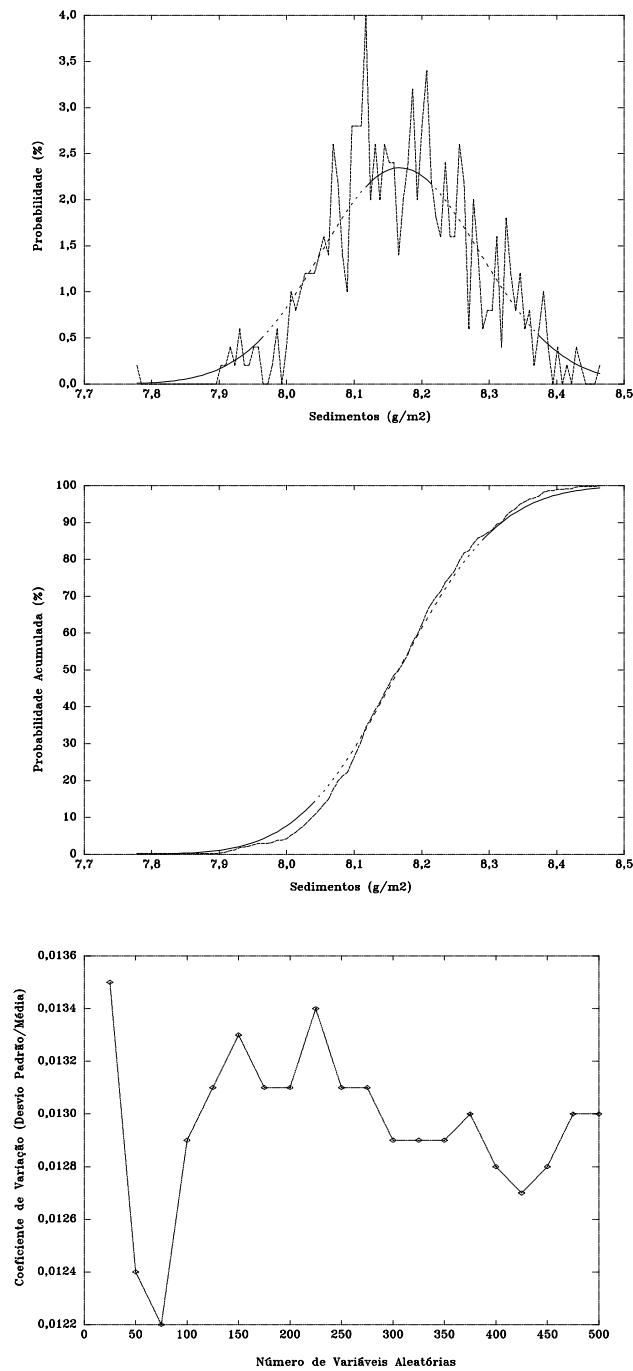


Figura I.9: Simulação dos valores de sedimentos pelo método de Monte Carlo para a geração de 500 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

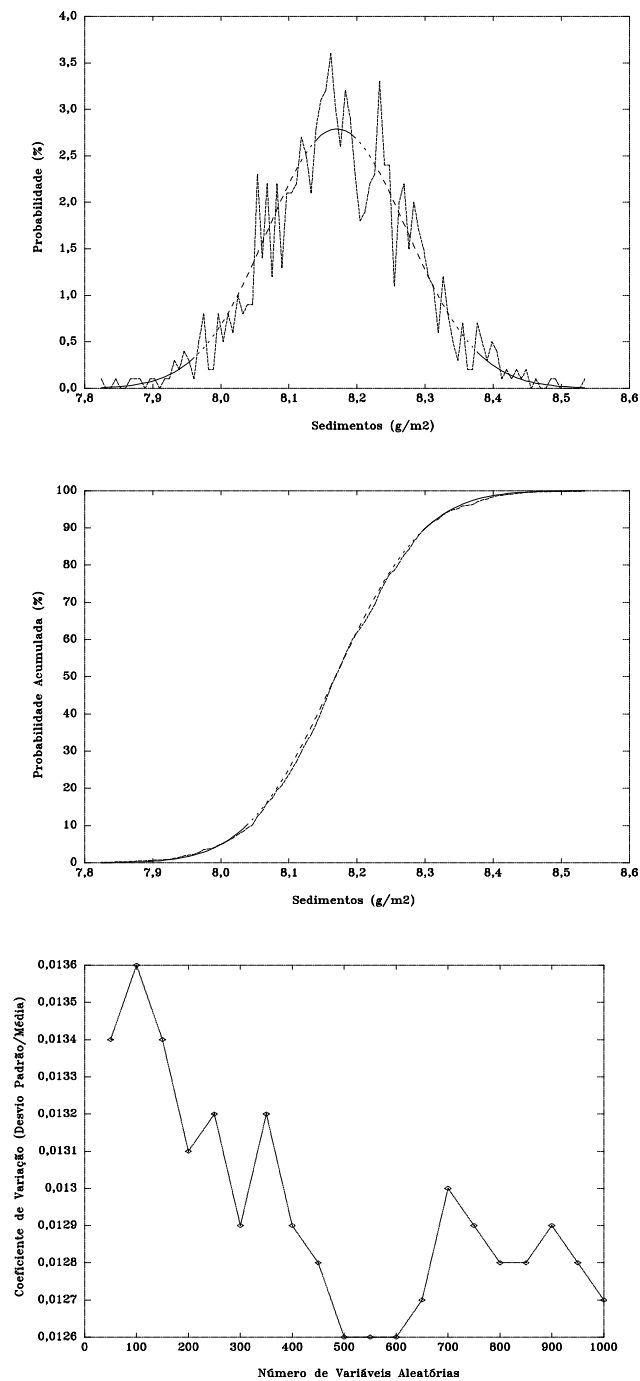


Figura I.10: Simulação dos valores de sedimentos pelo método de Monte Carlo para a geração de 1 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

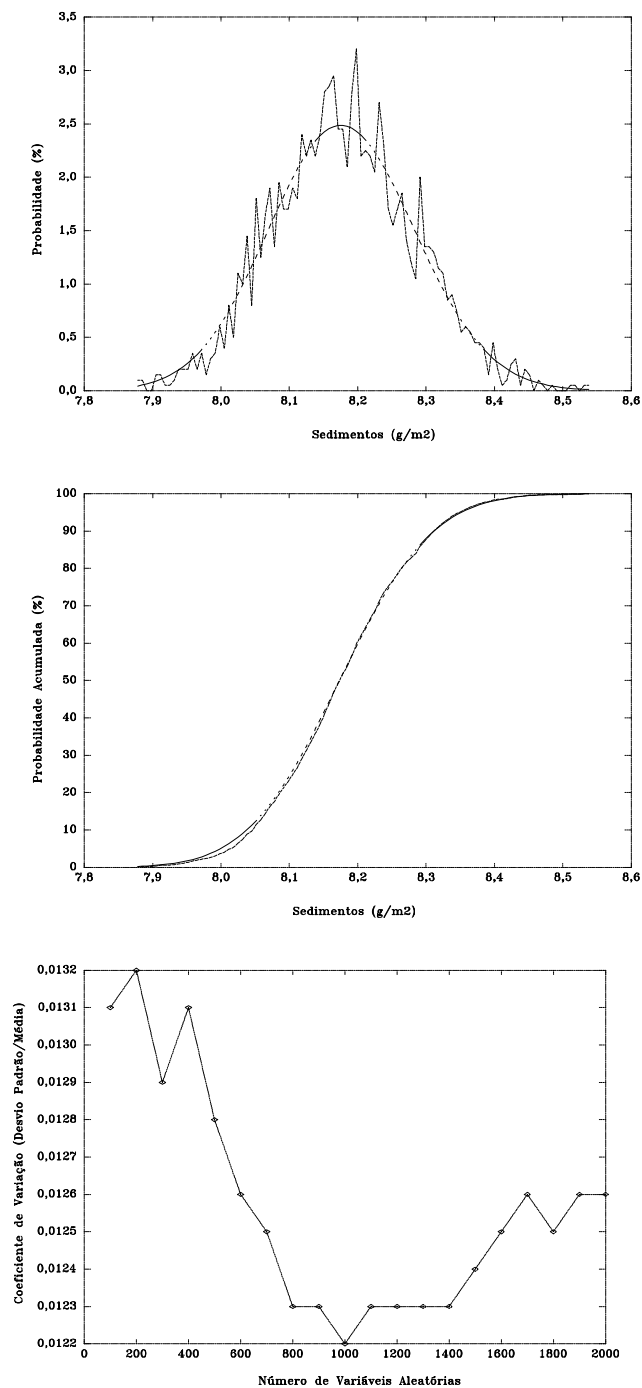


Figura I.11: Simulação dos valores de sedimentos pelo método de Monte Carlo para a geração de 2 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

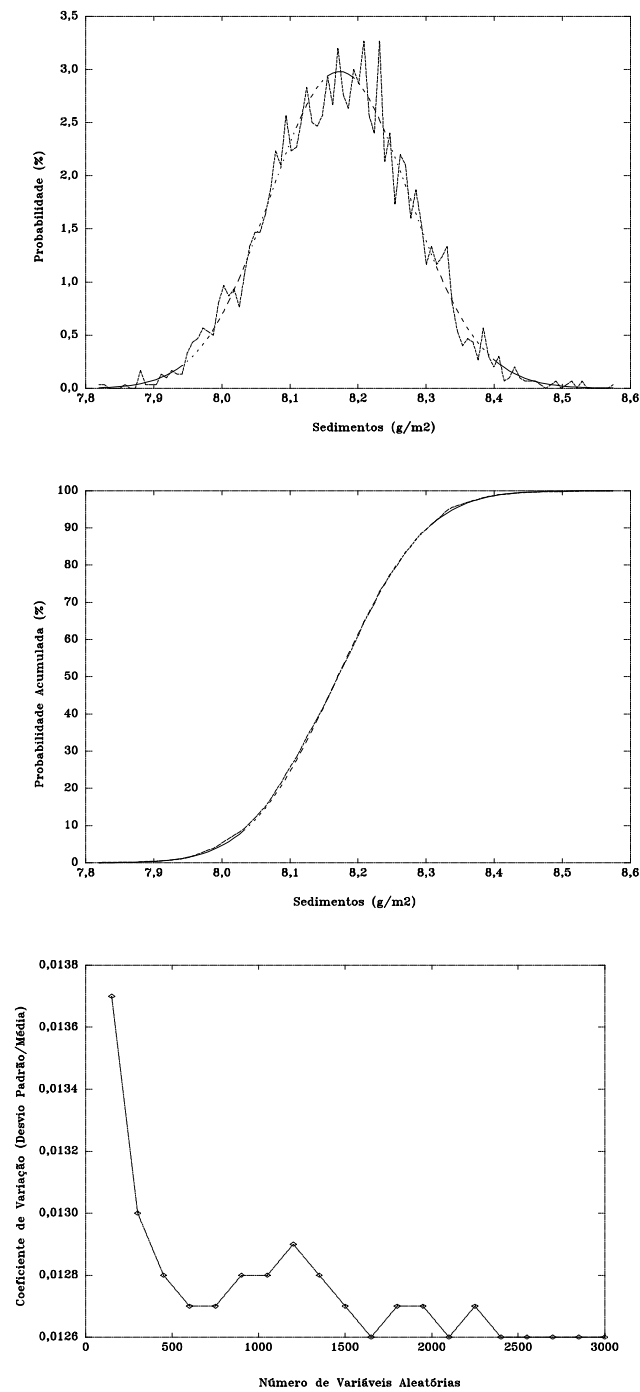


Figura I.12: Simulação dos sedimentos pelo método de Monte Carlo para a geração de 3 000 variáveis aleatórias, associados a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

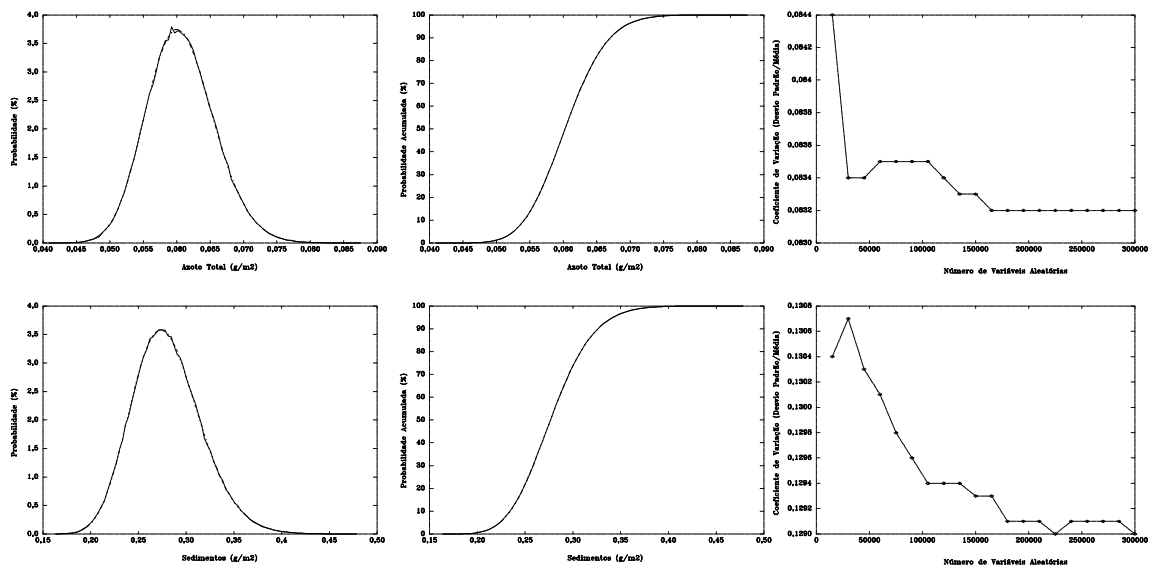


Figura I.13: Simulação com 300 000 variáveis aleatórias de nove células para o azoto total e sedimentos, associado a uma pluviosidade de 20mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

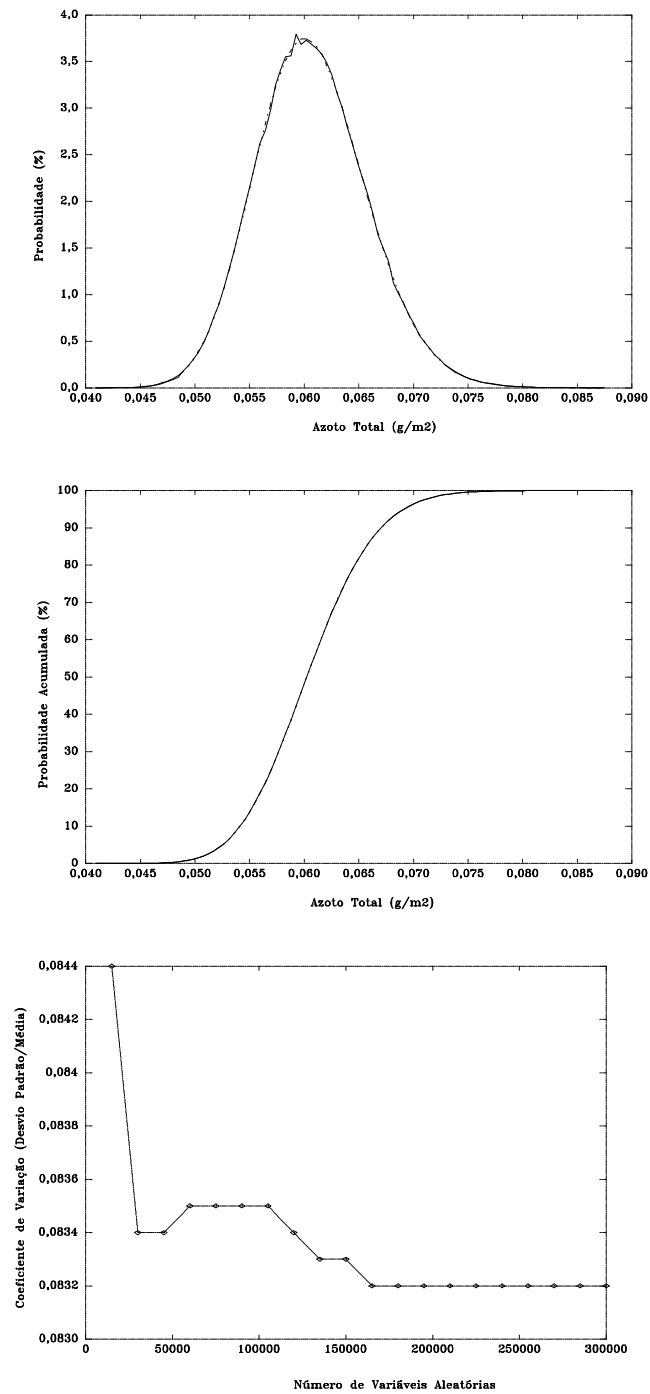


Figura I.14: Simulação com 300 000 variáveis aleatórias de nove células para o azoto total, associado a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

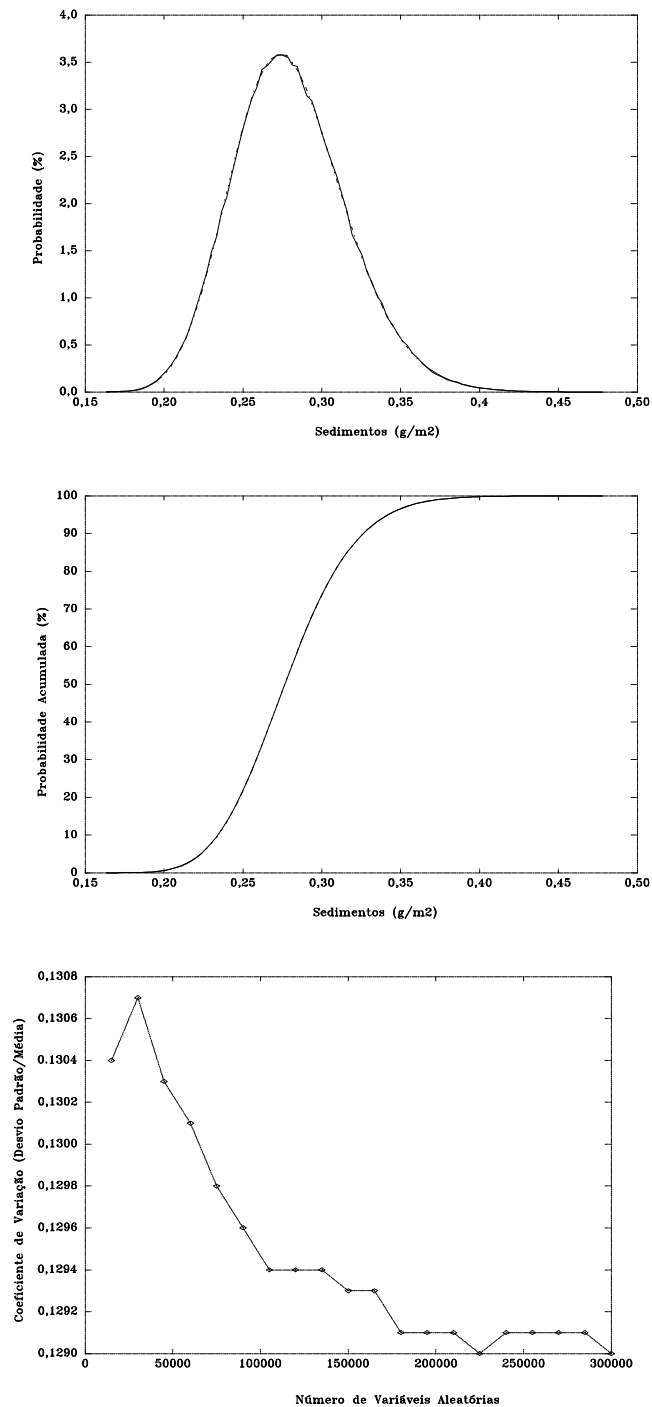


Figura I.15: Simulação com 300 000 variáveis aleatórias em nove células para os sedimentos, associado a uma pluviosidade de 20 mm com a duração de uma hora e condição de humidade do solo AMCII.

Apêndice J

Código do modelo - Fortran 90

J.1 bacia.f90

O ficheiro bacia.f90 corresponde ao módulo mod_bacia que contem a subrotina sub_bacia(). Esta subrotina tem como função determinar a área da bacia hidrográfica relativa a qualquer célula.

O princípio para o cálculo corresponde em adicionar à área da célula em estudo o somatório das áreas das bacias hidrográficas dos troços afluentes. O cálculo é efectuado segundo o número de ordem dos troços de linha de água (ordem crescente)

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_ordemtroco - Ordena os troços de linha de água na bacia hidrográfica.

```
!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_bacia.....***
!Subrotina : sub_bacia - Determinação da área da bacia.....***
!*****
!Definição de variáveis :.....***
!areai - área da bacia hidrográfica para a célula.....***
!referenciada, m2.....***
!a_bacia(:) - área da bacia hidrográfica para a célula.....***
!referenciada, m2.....***
!i - variável de contagem.....***
!k - variável de contagem.....***
!*****
module mod_bacia
use mod_ficheiros
use mod_ordemtroco
implicit none
!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision, dimension(:),allocatable, public ::a_bacia
contains
subroutine sub_bacia()
!***Definição de variáveis privadas.....***
```

```
double precision :: areai
integer :: i,k
if(.not. allocated(a_bacia)) allocate (a_bacia(ntrocos))
!***Linhas com número de ordem igual a 1.....***
do i =1,ntrocos
if(ordemtroco(i,1)==1) then
    a_bacia(i) = dx**2.0 !-->(m2)
end if
!***Linhas com número de ordem superior a 1.....***
if(ordemtroco(i,1)>1) then
    areai = dx**2.0 !-->(m2)
    do k = 1,i
        if (ordemtroco(k,4) == ordemtroco(i,3)) then
            areai = areai + a_bacia(k)
        end if
    end do
    a_bacia(i) = areai !-->(m2)
end if
end do
end subroutine sub_bacia
end module mod_bacia
```

J.2 balpol.f90

O ficheiro balpol.f90 corresponde ao módulo mod_balpol que contem a subrotina sub_balpol(). Esta subrotina tem como função determinar o balanço de poluentes em cada célula.

O princípio de cálculo corresponde ao somatório dos poluentes gerados nos troços de montante adicionados aos gerados na própria célula. O cálculo é efectuado segundo o número de ordem dos troços de linha de água (ordem crescente).

Este balanço é efectuado para cada conjunto de variáveis aleatórias geradas pelo método de Monte Carlo.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_ordentroco - Ordena os troços de linha de água na bacia hidrográfica.
- mod_wanielista - Determina a lixiviação de poluentes segundo o modelo exponencial.
- mod_montecarlo - Gerador de variáveis aleatórias com distribuição lognormal para o método de Monte Carlo.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_balpol.....***
!Subrotina : sub_balpol - Balanço de poluentes na bacia.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! i - variável.....***
! j - variável.....***
! k - variável.....***
! mpolij - massa de poluente gerada na célula (i) no tempo...***
!      (jmax) - g/m2.....***
! mtpol(:) - massa total de poluente gerado na bacia que tem.***
!      como secção de referência a célula em.....***
!      estudo, g/m2.....***
!*****
module mod_balpol
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordentroco
!***Módulo que determina a libertação de poluentes.....***
use mod_wanielista
!***Módulo que desenvolve o método de Monte Carlo.....***
use mod_montecarlo
!***Módulo que aplica a USLE.....***
use mod_usle
implicit none
!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision, dimension(:,:),allocatable, public ::mtpol,&
mpol_media,mpol_dpadrao

```



```

double precision, dimension(:),allocatable, public :: mpol_max,&
mpol_min
contains
subroutine sub_balpol()
!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision :: mpolij
Integer :: i,j,k,n,n_table
if(.not. allocated(mtpol)) allocate (mtpol(ntrocos,nmcarlo))
if(.not. allocated(mpol_max)) allocate (mpol_max(ntrocos))
if(.not. allocated(mpol_min)) allocate (mpol_min(ntrocos))
if(.not. allocated(mpol_media)) allocate (mpol_media(ntrocos,20))
if(.not. allocated(mpol_dpadroao)) allocate (mpol_dpadroao(ntrocos,20))
!*****
!***Balanço de massa do poluente na bacia.....***
!*****
!***A massa no Nó 1 de um troço de jusante é igual ao.....***
!somatório das massas do Nó 2 dos troços a montante.....***
!*****
do j=1,nmcarlo
do i=1,ntrocos
mpolij = 0.0 !-->(g/m2)
!***Linhas com número de ordem igual a 1.....***
if(ordemtroco(i,1)==1) mtpol(i,j) = mpolacum(i,j) !-->(g/m2)
!***Linhas com número de ordem superior a 1.....***
if(ordemtroco(i,1)>1) then
mpolij = mpolacum(i,j) !-->(g/m2)
do k =1,i
if (ordemtroco(k,4) == ordemtroco(i,3)) mpolij = mpolij + mtpol(k,j) !-->(g/m2)
end do
mtpol(i,j) = mpolij !-->(g/m2)
end if
end do
end do
do i = 1,ntrocos
mpol_max(i) = 0.0
mpol_min(i) = 1.0e12
do j= 1,nmcarlo
if(mtpol(i,j)*dx**2.0/1000.0 > mpol_max(i)) mpol_max(i) =&
mtpol(i,j)*dx**2.0/1000.0
if(mtpol(i,j)*dx**2.0/1000.0 < mpol_min(i)) mpol_min(i) =&
mtpol(i,j)*dx**2.0/1000.0
if (j==1) then
n=1
n_table = n_nmcarlo(n)
end if
if(j==n_table) then
do k=1,j
if (k==1) mpol_media(i,n) = mtpol(i,k)*dx**2.0/1000.0
if (k >1) mpol_media(i,n) = mpol_media(i,n) + mtpol(i,k)&
*dx**2.0/1000.0
end do
mpol_media(i,n) = mpol_media(i,n)/dble(j)
mpol_dpadroao(i,n) = 0.0
do k = 1,j
mpol_dpadroao(i,n) = mpol_dpadroao(i,n) + (mtpol(i,k)&
*dx**2.0/1000.0 - mpol_media(i,n))*2.0
end do
mpol_dpadroao(i,n)=sqrt(mpol_dpadroao(i,n)/(dble(j)-1.0))
n = n+1
n_table = n_nmcarlo(n)
end if

```

```
end do
end do
deallocate(mpolacum)
return
end subroutine sub_balpol
end module mod_balpol
```

J.3 baled.f90

O ficheiro baled.f90 corresponde ao módulo mod_baled que contem a subrotina sub_baled(). Esta subrotina tem como função determinar o balanço de sedimentos erodidos e transportados em cada célula.

O princípio de cálculo corresponde aos sedimentos gerados em cada sub-bacia(i) formada por cada célula. Este cálculo é efectuado para cada conjunto de variáveis aleatórias geradas pelo método de Monte Carlo.

Os sedimentos são gerados pela subrotina sub_usle() (ficheiro usle.f90) e a capacidade de transporte de sedimentos é obtida pela subrotina sub_roehl() (ficheiro Roehl.f90).

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_ordemtroco - Ordena os troços de linha de água na bacia hidrográfica.
- mod_usle - Determina a erosão pela Equação Universal da Perda de Solo (USLE)
- mod_roehl - Determina a capacidade de transporte de sedimentos
- mod_montecarlo - Gerador de variáveis aleatórias com distribuição lognormal para o método de Monte Carlo.

```
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_baled.....***
!Subrotina : sub_baled - Balanço de sedimentos na bacia....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! a_bacia(i) - Área da bacia hidrográfica formada pela.....***
!           célula, m2.....***
! e_usle(i) - massa de sedimentos erodidos, g/m2.....***
! msed_transp(i) - massa de sedimentos transportada na bacia.***
!           formada pela célula.....***
! roehl(i) - coeficiente de produção de sedimentos.....***
!*****
module mod_baled
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordemtroco
!***Módulo que determina a a massa de sedimentos erodidos a.***
!partir da Equação Universal da Perda de Solo desenvolvida...***
!por Wishmeier Smith (1965).....***
use mod_usle
!***Módulo que determina o coeficiente de produção.....***
!de sedimentos de acordo com o modelo empírico de.....***
!Roehl (1962) in Cardoso (1998).....***
use mod_roehl
use mod_montecarlo
implicit none
```

```

!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision, dimension(:,:),allocatable, public :: msed_transp,&
msed_media,msed_dpadrao
double precision, dimension(:),allocatable, public:: msed_max,&
msed_min
contains
subroutine sub_balsed()
!***Definição de variáveis públicas.....***
Integer :: i,j,k,n,n_table
if(.not. allocated(msed_transp)) allocate (msed_transp(ntrococ,nmcarlo))
if(.not. allocated(msed_max)) allocate (msed_max(ntrococ))
if(.not. allocated(msed_min)) allocate (msed_min(ntrococ))
if(.not. allocated(msed_media)) allocate (msed_media(ntrococ,20))
if(.not. allocated(msed_dpadrao)) allocate (msed_dpadrao(ntrococ,20))
do i = 1,ntrococ
msed_max(i) = 0.0
msed_min(i) = 1.0e12
do j= 1,nmcarlo
msed_transp(i,j) = e_usle(i,j)*a_bacia(i)*roehl(i)!-->(kg)
!*****
if(msed_transp(i,j) > msed_max(i)) msed_max(i) = msed_transp(i,j)
if(msed_transp(i,j) < msed_min(i)) msed_min(i) = msed_transp(i,j)
if (j==1) then
n=1
n_table = n_nmcarlo(n)
end if
if(j==n_table) then
do k=1,j
if (k==1) msed_media(i,n) = msed_transp(i,k)
if (k >1) msed_media(i,n) = msed_media(i,n) + msed_transp(i,k)
end do
msed_media(i,n) = msed_media(i,n)/dble(j)
msed_dpadrao(i,n) = 0.0
do k = 1,j
msed_dpadrao(i,n) = msed_dpadrao(i,n) + (msed_transp(i,k)&
- msed_media(i,n))*2.0
end do
msed_dpadrao(i,n)=sqrt(msed_dpadrao(i,n)/(dble(j)-1.0))
n = n+1
n_table = n_nmcarlo(n)
end if
end do
end do
deallocate(e_usle)
return
end subroutine sub_balsed
end module mod_balsed

```

J.4 diversos.f90

O ficheiro diversos.f90 corresponde ao módulo mod_diversos que contem a subrotina sub_ccelula() e a função fun_ncelula() :

- A subrotina sub_ccelula() tem como função determinar as coordenadas de uma célula a partir do seu número.
- A função fun_ncelula() tem como função determinar o número de uma célula a partir das suas coordenadas.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_diversos.....***
!Funções :.....***
!   - fun_ncelula - determina o numero da célula a partir da.***
!                   coordenada desta.....***
!   - fun_ccelula - determina a coordenada da célula a partir***
!                   do número desta.....***
!*****
!Definição de variáveis :.....***
! colmax - número máximo de colunas da bacia hidrográfica....***
! i - variável de contagem.....***
! j - variável de contagem.....***
! ncelula - número de célula.....***
! nx - coordenda xx da célula.....***
! ny - coordenda yy da célula.....***
! linmax - número máximo de linhas da bacia hidrográfica....***
! x - variável de contagem.....***
!*****
module mod_diversos
implicit none
contains
!*****
!FUN_NCELULA --> «determinação do número da célula a.....***
!partir das coordenadas da mesma.».....***
!*****
function fun_ncelula(nx,ny,colmax,linmax) result(ncelula)
integer :: nx,ny,ncelula, linmax, colmax, i,j,x
ncelula = 0
x = 1
do i = 1,linmax
do j = 1,colmax
if (j==ny .and. i==nx) then
ncelula = x
endif
x = x+1
end do
end do
end function fun_ncelula
!*****
!SUB_CCELULA --> «determinação das coordenadas nx e ny.....***
!da célula a partir do seu número.».....***
!*****
subroutine sub_ccelula(ncelula,colmax,linmax, nx,ny)

```

```
integer :: nx,ny,ncelula, linmax, colmax, i,j,x
x = 0
do i = 1,linmax
do j = 1,colmax
x = x+1
if (x == ncelula) then
nx = i
ny = j
endif
end do
end do
end subroutine sub_ccelula
end module mod_diversos
```

J.5 escoamento.f90

O ficheiro escoamento.f90 corresponde ao módulo mod_escoamento que contem a sub-rotina sub_escoamento(). Esta subrotina tem como função determinar o excesso hídrico em cada célula da bacia hidrográfica a partir de um determinado hietograma.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_no1no2 - Determina a direcção do escoamento na bacia hidrográfica. Atribui a numeração do nó 1 e nó 2 de cada troço.
- mod_ordemtroco - Ordena os troços de linha de água na bacia hidrográfica.
- mod_scs - Determina o excesso hídrico a partir do método do Soil Conservation Service.
- mod_bacia - Determina a área da bacia hidrográfica em cada célula.

```
!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_hidrocinamica.....***
!Subrotina : sub_escoamento - modelo de escoamento na.....***
!                                     bacia hidrográfica.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! alfa - constante.....***
! amc - grau de humidade do solo.....***
! area - área da célula.....***
! chuva - precipitação, mm.....***
! chuvaenolacum(i,j) - chuva efectiva acumulada no nó 1.....***
!                                     do troço i no tempo j, m.....***
! cn - curva número do SCS.....***
! colmax - número máximo de colunas.....***
! dt - intervalo de tempo, s.....***
! dx - intervalo de espaço, m.....***
! ichuva(j) - intensidade pluviométrica, m/s.....***
! i - numeração de células.....***
! imax - máximo numero de células.....***
! j - numeração dos intervalos de tempo.....***
! k - variável auxiliar.....***
! ki - variável auxiliar.....***
! kj - variável auxiliar.....***
! jmax - máximo intervalo de tempo.....***
! linmax - numero máximo de linhas.....***
! ltroco - comprimento de troco, m.....***
! nno1 - coeficiente de Manning no nó 1, s/m**(1/3).....***
! no1 - número do nó 1 do troço.....***
! no2 - número do nó 2 do troço.....***
! nx - número de colunas.....***
! ny - número de linhas.....***
! ql - caudal unitário de percurso, m**2/s.....***
! s1 - variável auxiliar para a declividade do solo, m/m.....***
```

```

! z(:, :) - matriz da altimetria da bacia hidrográfica, m....***
!*****
module mod_escoamento
!***Módulo do método do Soil Conservation Service.....***
use mod_scs
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do escoamento entre células.....***
use mod_no1no2
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordentroco
!***Módulo de determinação da área por sub-bacia.....***
use mod_bacia
implicit none
!***Definição de Variáveis Públicas***
double precision, dimension(:), allocatable, public::vescoa, chuva, eacum
contains
subroutine sub_escoamento()
!***Definição de Variáveis Privadas***
double precision :: n, nno1, nno2, c, b, chuva, cn, vacum, rchuva
integer :: i, j, k
!*****
!***Carregamento dos ficheiros de dados [*.TXT] em memória...***
!*****
write(*,*) '01/12 - Leitura dos ficheiros de dados...'
call sub_ficheiros()
!*****
!***Definição dos troços da bacia hidrográfica.....***
!*****
write(*,*) '02/12 - Definicao das linhas de agua...'
call sub_no1no2()
!*****
!***Definição do número de ordem dos troços.....***
!*****
write(*,*) '03/12 - Determinacao do numero de ordem das &
linhas de agua...'
call sub_ordentroco()
write(*,*) '04/12 - Determinacao da area de cada sub-bacia...'
call sub_bacia()
write(*,*) '05/12 - Determinacao do Escoamento por sub-bacia...'
!*****
!***Definição das matrizes de cálculo de caudais.....***
!*****
if(.not. allocated(vescoa)) allocate (vescoa(ntrocos))
if(.not. allocated(chuva, eacum)) allocate (chuva, eacum(ntrocos))
chuva = 0.0
do j = 1, jchuva
!***valor acumulado da chuva.....***
if (j <= jchuva) chuva = chuva + ichuva(j)*dt/3600.0 !-->(mm)
end do
rchuva = chuva*dt*jchuva/3600.0
do i = 1, ntrocos
!***Chuva efectiva acumulada no Nó 1 do troço i.....***
!***Condição de humidade AMCII.....***
cn = cls_solo(ordentroco(i,5),1)!-->(...)
!***Condição de humidade AMCI.....***
if(amc ==1) cn = 4.2*cn/(10.0 - 0.058*cn)
!***Condição de humidade AMCIII.....***
if(amc ==3) cn = 23.0*cn/(10.0 + 0.13*cn )
chuva, eacum(i) = fun_chuva(chuva, rchuva, cn)/1000.0 !-->(m)
!***Volume Escoado por sub_bacia.....***

```



```
!***Linhas com número de ordem igual a 1.....***
  if(ordentroco(i,1)==1) then
    vescoa(i) = chuvaeacum(i)*dx**2.0 !-->(m3)
  end if
!***Linhas com número de ordem superior a 1.....***
  if(ordentroco(i,1)>1) then
    vacum = chuvaeacum(i)*dx**2.0
    do k =1,i
      if(ordentroco(k,4)==ordentroco(i,3)) vacum = vacum + vescoa(k)!-->(m3)
    end do
    vescoa(i) = vacum !-->(m3)
  end if
end do
return
end subroutine sub_escoamento
end module mod_escoamento
```

J.6 estatistica.f90

O ficheiro estatistica.f90 corresponde ao módulo mod_estatistica que contem a subrotina sub_estatistica(). Esta subrotina tem como função determinar as variáveis estatísticas do método de Monte Carlo (frequências e frequências acumuladas, médias, percentil 50 e percentil 90).

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_no1no2 - Determina a direcção do escoamento na bacia hidrográfica. Atribui a numeração do nó 1 e nó 2 de cada troço.
- mod_ordentroco - Ordena os troços de linha de água na bacia hidrográfica.
- mod_scs - Determina o excesso hídrico a partir do método do Soil Conservation Service.
- mod_bacia - Determina a área da bacia hidrográfica em cada célula.
- Numerical_Libraries - Livraria de matemática da IMSL (Digital Fortran 5.0).
- mod_montecarlo - Gerador de variáveis aleatórias para o método de Monte Carlo.
- mod_balpol - Determinação do balanço de poluentes na bacia hidrográfica.
- mod_balsed - Determinação do balanço de sedimentos na bacia hidrográfica.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_estatistica.....***
!Subrotina : sub_estatistica - Análise Estatística do método.***
!
!       de MonteCarlo.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
!*****
module mod_estatistica
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do escoamento entre células.....***
use mod_no1no2
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordentroco
!***Módulo de matemática do Digital Fortran.....***
use Numerical_Libraries
!***Módulo de geração de variáveis aleatórias.....***
use mod_montecarlo
use mod_balpol
use mod_balsed
implicit none
!***Definição de variáveis públicas***
contains

```

```

subroutine sub_estatistica()
!***Definição de Variáveis Privadas.....***
double precision, dimension(:),allocatable::div_p0, div_c, &
div_k_usle, div_c_usle, div_p_usle, div_mpol, div_msed
double precision, dimension(:),allocatable::table_p0, table_c,&
table_k_usle, table_c_usle, table_p_usle, table_mpol, table_msed
double precision, dimension(:),allocatable::p0_stat,c_stat, &
k_usle_stat, c_usle_stat, p_usle_stat, mpol_stat, msed_stat
double precision, dimension(:),allocatable::p0_p50,c_p50, &
k_usle_p50, c_usle_p50, p_usle_p50, mpol_p50, msed_p50
double precision, dimension(:),allocatable::p0_p90,c_p90, &
k_usle_p90, c_usle_p90, p_usle_p90, mpol_p90, msed_p90
double precision, dimension(:,:),allocatable:: div_p0_freq, &
div_c_freq, div_k_usle_freq,div_c_usle_freq,div_p_usle_freq,&
div_mpol_freq, div_msed_freq
double precision, dimension(:,:),allocatable:: table_p0_freq, &
table_c_freq, table_k_usle_freq,table_c_usle_freq,&
table_p_usle_freq,table_mpol_freq, table_msed_freq
double precision, dimension(:,:),allocatable:: table_p0_freq_acum,&
table_c_freq_acum, table_k_usle_freq_acum,table_c_usle_freq_acum,&
table_p_usle_freq_acum,table_mpol_freq_acum, table_msed_freq_acum
double precision, dimension(:,:),allocatable:: xy1_z,xy2_z
integer, dimension(:),allocatable:: xy1_solo
integer :: i,j,k,iopt,nx,ny,nnol,ntroco
double precision :: clhw, xhi, xlo,dprob,dpint,dvalor
external dowfrq
k = 100
iopt = 0
if(.not. allocated(div_p0)) allocate (div_p0(k))
if(.not. allocated(div_c)) allocate (div_c(k))
if(.not. allocated(div_k_usle)) allocate (div_k_usle(k))
if(.not. allocated(div_c_usle)) allocate (div_c_usle(k))
if(.not. allocated(div_p_usle)) allocate (div_p_usle(k))
if(.not. allocated(div_mpol)) allocate (div_mpol(k))
if(.not. allocated(div_msed)) allocate (div_msed(k))
!***.....***
if(.not. allocated(table_p0)) allocate (table_p0(k))
if(.not. allocated(table_c)) allocate (table_c(k))
if(.not. allocated(table_k_usle)) allocate (table_k_usle(k))
if(.not. allocated(table_c_usle)) allocate (table_c_usle(k))
if(.not. allocated(table_p_usle)) allocate (table_p_usle(k))
if(.not. allocated(table_mpol)) allocate (table_mpol(k))
if(.not. allocated(table_msed)) allocate (table_msed(k))
!***.....***
if(.not. allocated(div_p0_freq)) allocate (div_p0_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(div_c_freq)) allocate (div_c_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(div_k_usle_freq)) allocate (div_k_usle_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(div_c_usle_freq)) allocate (div_c_usle_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(div_p_usle_freq)) allocate (div_p_usle_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(div_mpol_freq)) allocate (div_mpol_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(div_msed_freq)) allocate (div_msed_freq(ntrocos,k))
!***.....***
if(.not. allocated(table_p0_freq)) allocate (table_p0_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(table_c_freq)) allocate (table_c_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(table_k_usle_freq)) allocate (table_k_usle_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(table_c_usle_freq)) allocate (table_c_usle_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(table_p_usle_freq)) allocate (table_p_usle_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(table_mpol_freq)) allocate (table_mpol_freq(ntrocos,k))
if(.not. allocated(table_msed_freq)) allocate (table_msed_freq(ntrocos,k))
!***.....***
if(.not. allocated(table_p0_freq_acum)) allocate (table_p0_freq_acum(ntrocos,k))

```

```

if(.not. allocated(table_c_freq_acum)) allocate (table_c_freq_acum(ntrococ,k))
if(.not. allocated(table_k_usle_freq_acum)) allocate (table_k_usle_freq_acum(ntrococ,k))
if(.not. allocated(table_c_usle_freq_acum)) allocate (table_c_usle_freq_acum(ntrococ,k))
if(.not. allocated(table_p_usle_freq_acum)) allocate (table_p_usle_freq_acum(ntrococ,k))
if(.not. allocated(table_mpol_freq_acum)) allocate (table_mpol_freq_acum(ntrococ,k))
if(.not. allocated(table_msed_freq_acum)) allocate (table_msed_freq_acum(ntrococ,k))
!***.....***
if(.not. allocated(p0_stat)) allocate (p0_stat(nmcarlo))
if(.not. allocated(c_stat)) allocate (c_stat(nmcarlo))
if(.not. allocated(k_usle_stat)) allocate (k_usle_stat(nmcarlo))
if(.not. allocated(c_usle_stat)) allocate (c_usle_stat(nmcarlo))
if(.not. allocated(p_usle_stat)) allocate (p_usle_stat(nmcarlo))
if(.not. allocated(mpol_stat)) allocate (mpol_stat(nmcarlo))
if(.not. allocated(msed_stat)) allocate (msed_stat(nmcarlo))
!*****
if(.not. allocated(p0_p50)) allocate (p0_p50(ntrococ))
if(.not. allocated(c_p50)) allocate (c_p50(ntrococ))
if(.not. allocated(k_usle_p50)) allocate (k_usle_p50(ntrococ))
if(.not. allocated(c_usle_p50)) allocate (c_usle_p50(ntrococ))
if(.not. allocated(p_usle_p50)) allocate (p_usle_p50(ntrococ))
if(.not. allocated(mpol_p50)) allocate (mpol_p50(ntrococ))
if(.not. allocated(msed_p50)) allocate (msed_p50(ntrococ))
!*****
if(.not. allocated(p0_p90)) allocate (p0_p90(ntrococ))
if(.not. allocated(c_p90)) allocate (c_p90(ntrococ))
if(.not. allocated(k_usle_p90)) allocate (k_usle_p90(ntrococ))
if(.not. allocated(c_usle_p90)) allocate (c_usle_p90(ntrococ))
if(.not. allocated(p_usle_p90)) allocate (p_usle_p90(ntrococ))
if(.not. allocated(mpol_p90)) allocate (mpol_p90(ntrococ))
if(.not. allocated(msed_p90)) allocate (msed_p90(ntrococ))
!*****
if(.not. allocated(xy1_z)) allocate (xy1_z(ntrococ,3))
if(.not. allocated(xy1_solo)) allocate (xy1_solo(ntrococ))
if(.not. allocated(xy2_z)) allocate (xy2_z(ntrococ,3))
write(*,*) '12/12 - Analise estatística dos dados e resultados...'
!*****
do i = 1, ntrococ
do j = 1, nmcarlo
p0_stat(j) = p0(i,j)
c_stat(j) = c(i,j)
k_usle_stat(j) = k_usle(i,j)
c_usle_stat(j) = c_usle(i,j)
p_usle_stat(j) = p_usle(i,j)
mpol_stat(j) = mtpol(i,j)*dx**2.0/1000.0
msed_stat(j) = msed_transp(i,j)
end do
call dowfrq(nmcarlo,p0_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_p0,table_p0)
call dowfrq(nmcarlo,c_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_c,table_c)
call dowfrq(nmcarlo,k_usle_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_k_usle,table_k_usle)
call dowfrq(nmcarlo,c_usle_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_c_usle,table_c_usle)
call dowfrq(nmcarlo,p_usle_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_p_usle,table_p_usle)
call dowfrq(nmcarlo,mpol_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_mpol,table_mpol)
call dowfrq(nmcarlo,msed_stat,k,iopt,xlo,xhi,clhw,div_msed,table_msed)
do j = 1,k
!***
div_p0_freq(i,j) = div_p0(j)
table_p0_freq(i,j) = table_p0(j)
if (j==1) table_p0_freq_acum(i,j) = table_p0(j)
if (j>1) table_p0_freq_acum(i,j) = table_p0(j) + table_p0_freq_acum(i,j-1)
!***
div_c_freq(i,j) = div_c(j)

```

```

table_c_freq(i,j) = table_c(j)
if (j==1) table_c_freq_acum(i,j) = table_c(j)
if (j>1) table_c_freq_acum(i,j) = table_c(j) + table_c_freq_acum(i,j-1)
!***
div_k_usle_freq(i,j) = div_k_usle(j)
table_k_usle_freq(i,j) = table_k_usle(j)
if (j==1) table_k_usle_freq_acum(i,j) = table_k_usle(j)
if (j>1) table_k_usle_freq_acum(i,j) = table_k_usle(j) + table_k_usle_freq_acum(i,j-1)
!***
div_c_usle_freq(i,j) = div_c_usle(j)
table_c_usle_freq(i,j) = table_c_usle(j)
if (j==1) table_c_usle_freq_acum(i,j) = table_c_usle(j)
if (j>1) table_c_usle_freq_acum(i,j) = table_c_usle(j) + table_c_usle_freq_acum(i,j-1)
!***
div_p_usle_freq(i,j) = div_p_usle(j)
table_p_usle_freq(i,j) = table_p_usle(j)
if (j==1) table_p_usle_freq_acum(i,j) = table_p_usle(j)
if (j>1) table_p_usle_freq_acum(i,j) = table_p_usle(j) + table_p_usle_freq_acum(i,j-1)
!***
div_mpol_freq(i,j) = div_mpol(j)
table_mpol_freq(i,j) = table_mpol(j)
if (j==1) table_mpol_freq_acum(i,j) = table_mpol(j)
if (j>1) table_mpol_freq_acum(i,j) = table_mpol(j) + table_mpol_freq_acum(i,j-1)
!***
div_msed_freq(i,j) = div_msed(j)
table_msed_freq(i,j) = table_msed(j)
if (j==1) table_msed_freq_acum(i,j) = table_msed(j)
if (j>1) table_msed_freq_acum(i,j) = table_msed(j) + table_msed_freq_acum(i,j-1)
end do
end do
!*****
!***Determinação da Mediana e do Percentil 90.....***
!*****
do i=1,ntrococ
do j=1,100
!***Determinação da Mediana.....***
if(table_p0_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)<0.5) then
dprob = (table_p0_freq_acum(i,j+1)-table_p0_freq_acum(i,j))/db1e(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_p0_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)
dvalor = div_p0_freq(i,j+1) - div_p0_freq(i,j)
p0_p50(i) = div_p0_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_c_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)<0.5) then
dprob = (table_c_freq_acum(i,j+1)-table_c_freq_acum(i,j))/db1e(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_c_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)
dvalor = div_c_freq(i,j+1) - div_c_freq(i,j)
c_p50(i) = div_c_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_k_usle_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)<0.5) then
dprob = (table_k_usle_freq_acum(i,j+1)-table_k_usle_freq_acum(i,j))/db1e(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_k_usle_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)
dvalor = div_k_usle_freq(i,j+1) - div_k_usle_freq(i,j)
k_usle_p50(i) = div_k_usle_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_c_usle_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)<0.5) then
dprob = (table_c_usle_freq_acum(i,j+1)-table_c_usle_freq_acum(i,j))/db1e(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_c_usle_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)
dvalor = div_c_usle_freq(i,j+1) - div_c_usle_freq(i,j)
c_usle_p50(i) = div_c_usle_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_p_usle_freq_acum(i,j)/db1e(nmcarlo)<0.5) then

```

```

dprob = (table_p_usle_freq_acum(i,j+1)-table_p_usle_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_p_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_p_usle_freq(i,j+1) - div_p_usle_freq(i,j)
p_usle_p50(i) = div_p_usle_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_mpol_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.5) then
dprob = (table_mpol_freq_acum(i,j+1)-table_mpol_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_mpol_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_mpol_freq(i,j+1) - div_mpol_freq(i,j)
mpol_p50(i) = div_mpol_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_msed_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.5) then
dprob = (table_msed_freq_acum(i,j+1)-table_msed_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.50 - table_msed_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_msed_freq(i,j+1) - div_msed_freq(i,j)
msed_p50(i) = div_msed_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
!***Determinação do Percentil 90.....***
if(table_p0_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_p0_freq_acum(i,j+1)-table_p0_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_p0_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_p0_freq(i,j+1) - div_p0_freq(i,j)
p0_p90(i) = div_p0_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_c_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_c_freq_acum(i,j+1)-table_c_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_c_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_c_freq(i,j+1) - div_c_freq(i,j)
c_p90(i) = div_c_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_k_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_k_usle_freq_acum(i,j+1)-table_k_usle_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_k_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_k_usle_freq(i,j+1) - div_k_usle_freq(i,j)
k_usle_p90(i) = div_k_usle_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_c_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_c_usle_freq_acum(i,j+1)-table_c_usle_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_c_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_c_usle_freq(i,j+1) - div_c_usle_freq(i,j)
c_usle_p90(i) = div_c_usle_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_p_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_p_usle_freq_acum(i,j+1)-table_p_usle_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_p_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_p_usle_freq(i,j+1) - div_p_usle_freq(i,j)
p_usle_p90(i) = div_p_usle_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_mpol_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_mpol_freq_acum(i,j+1)-table_mpol_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_mpol_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_mpol_freq(i,j+1) - div_mpol_freq(i,j)
mpol_p90(i) = div_mpol_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
if(table_msed_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)<0.9) then
dprob = (table_msed_freq_acum(i,j+1)-table_msed_freq_acum(i,j))/dble(nmcarlo)
dpint = 0.90 - table_msed_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo)
dvalor = div_msed_freq(i,j+1) - div_msed_freq(i,j)
msed_p90(i) = div_msed_freq(i,j) + dpint*dvalor/dprob
end if
end do

```

```

end do
!*****
!***Registo dos Resultados no ficheiro "ESTATISTICA.TXT"....***
!*****
close(1)
open(1,file='estatistica.txt', &
      form = 'formatted', action='write',&
      access='sequential',position = 'rewind')
!***.....***
!***Definição do Cabeçalho.....***
!***.....***
do i=1,ntrococ
call sub_ccelula(ordemtroco(i,3),colmax,linmax,nx,ny)
xy1_z(i,1) = (ny-1.0)*dx
xy1_z(i,2) = (nx-1.0)*dx
xy1_z(i,3) = z(nx,ny)
xy1_solo(i) = ocp_solo(nx,ny)
call sub_ccelula(ordemtroco(i,4),colmax,linmax,nx,ny)
xy2_z(i,1) = (ny-1.0)*dx
xy2_z(i,2) = (nx-1.0)*dx
xy2_z(i,3) = z(nx,ny)
end do
write(1,fmt=*) 'VALORES DA BACIA HIDROGRAFICA'
write(1,fmt='(30(A12))') ('|-----|',k=1,30)
write(1,fmt='(30(A12))') 'Ordem.....','Troço.....',&
'Nó 1.....','Nó 2.....',&
'XX N61 (m)...','YY N61 (m)...','ZZ N61 (m)...','Solo N61....',&
'XX N62 (m)...','YY N62 (m)...','ZZ N62 (m)...',&
'L (m).....','S(m/m).....','A.Bacia(ha)...','L.AGUA (m)...',&
'Vol.Esc(m3)...','Chu.Ef.(mm)...','C.Tr.Sed(%)...',&
'..P50 (kg)...','..P50(g/m2)...','[P50](mg/L)...',&
'..P90 (kg)...','..P90(g/m2)...','[P90](mg/L)...',&
'..S50 (ton)...','..S50(g/m2)...','[S50](mg/L)...',&
'S90 (ton)...','S90(g/m2)...','[S90](mg/L)...',&
write(1,fmt='(30(A12))') ('|=====|',k=1,30)
do i=1,ntrococ
write (1,'(4i12,3f12.2,i12,3f12.2,f12.2,f12.4,f12.0,2f12.3,f12.1,16f12.3)')&
ordemtroco(i,1),ordemtroco(i,2),ordemtroco(i,3),ordemtroco(i,4),&
xy1_z(i,1),xy1_z(i,2),xy1_z(i,3),xy1_solo(i),&
xy2_z(i,1),xy2_z(i,2),xy2_z(i,3),&
trcno1no2(ordemtroco(i,2),1),trcno1no2(ordemtroco(i,2),2),&
a_bacia(i)/10000.0,l_agua(i),vescoa(i),&
vescoa(i)*1000.0/a_bacia(i),roehl(i)*100.0,&
mpol_p50(i),mpol_p50(i)*1000.0/a_bacia(i),&
mpol_p50(i)*1000.0/vescoa(i),mpol_p90(i),&
mpol_p90(i)*1000.0/a_bacia(i),mpol_p90(i)*1000.0/vescoa(i),&
msed_p50(i)/1000.0,msed_p50(i)*1000.0/a_bacia(i),&
msed_p50(i)*1000.0/vescoa(i),&
msed_p90(i)/1000.0,msed_p90(i)*1000.0/a_bacia(i),&
msed_p90(i)*1000.0/vescoa(i)
end do
write(1,fmt='(30(A12))') ('|-----|',k=1,30)
write(1,*)
write(1,fmt='(a54,i12)') 'Número de Valores Gerados pelo Método &
de Monte Carlo :',nmcarlo
do i =1,ntrococ
write(1,fmt='(104(A12))') ('|=====|',k=1,104)
write(1,fmt='(4A12,100i12)') ('.....',k=1,4),(k,k=1,100)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|*****|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),...Parâmet...,&
'...P0.....','...Valor.....',(div_p0_freq(i,j),j=1,100)

```

```

write(1,fmt='(2a12,f12.3,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',p0_min(i),'...Probab....',&
(dble(table_p0_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50...',p0_p50(i),'...Prob.Acum.',&
(dble(table_p0_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90...',p0_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',p0_max(i),'...Média.....',(p0_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,100(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(p0_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,100(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(p0_dpadroao(i,j)/p0_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|-----|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),'...Parâmet...',&
'...C.....','...Valor.....',(div_c_freq(i,j),j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',c_min(i),'...Probab....',&
(dble(table_c_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50...',c_p50(i),'...Prob.Acum.',&
(dble(table_c_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90...',c_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',c_max(i),'...Média.....',(c_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(c_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(c_dpadroao(i,j)/c_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|-----|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),'...Parâmet...',&
'...K_USLE...','...Valor.....',(div_k_usle_freq(i,j),j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',k_usle_min(i),'...Probab....',&
(dble(table_k_usle_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50...',k_usle_p50(i),'...Prob.Acum.',&
(dble(table_k_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90...',k_usle_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',k_usle_max(i),'...Média.....',&
(k_usle_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(k_usle_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(k_usle_dpadroao(i,j)/k_usle_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|-----|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),'...Parâmet...',&
'...C_USLE...','...Valor.....',(div_c_usle_freq(i,j),j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',c_usle_min(i),'...Probab....',&
(dble(table_c_usle_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50...',c_usle_p50(i),'...Prob.Acum.',&
(dble(table_c_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90...',c_usle_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)

```



```

write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',c_usle_max(i),'...Média.....',(c_usle_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(c_usle_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(c_usle_dpadroao(i,j)/c_usle_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|-----|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),'...Parâmet...',&
'...P_USLE...', '...Valor.....', (div_p_usle_freq(i,j),j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',p_usle_min(i),'...Probab.....',&
(dble(table_p_usle_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50..',p_usle_p50(i),'...Prob.Acum..',&
(dble(table_p_usle_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90..',p_usle_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',p_usle_max(i),'...Média.....',(p_usle_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(p_usle_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(p_usle_dpadroao(i,j)/p_usle_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|-----|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),'...Parâmet...',&
'...M_POL...', '...Valor.....', (div_mpol_freq(i,j),j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',mpol_min(i),'...Probab.....',&
(dble(table_mpol_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50..',mpol_p50(i),'...Prob.Acum..',&
(dble(table_mpol_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90..',mpol_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',mpol_max(i),'...Média.....',(mpol_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(mpol_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(mpol_dpadroao(i,j)/mpol_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(104(A12))') ('|-----|',k=1,104)
write(1,fmt='(i12,3a12,100f12.4)') ordemtroco(i,3),'...Parâmet...',&
'...M_SED...', '...Valor.....', (div_msed_freq(i,j),j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Mínimo...',msed_min(i),'...Probab.....',&
(dble(table_msed_freq(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,100(f12.4))') '.....',&
'...Perc.50..',msed_p50(i),'...Prob.Acum..',&
(dble(table_msed_freq_acum(i,j)/dble(nmcarlo))*100.0,j=1,100)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.0))') '.....',&
'...Perc.90..',msed_p90(i),'...n_mcarlo..',(n_nmcarlo(j),j=1,20)
write(1,fmt='(2a12,f12.4,a12,20(f12.4))') '.....',&
'...Máximo...',msed_max(i),'...Média.....',(msed_media(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...D.Padrão..',(msed_dpadroao(i,j),j=1,20)
write(1,fmt='(4a12,20(f12.4))') ('.....',k=1,3),&
'...C.Var.....',(msed_dpadroao(i,j)/msed_media(i,j),j=1,20)
end do
close(2)
close(3)
close(4)

```

```

close(5)
close(6)
close(7)
close(8)
close(9)
close(11)
close(12)
close(13)
open(2,file='xy_m3.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(3,file='xy_mm.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(4,file='xy_Roehl.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(5,file='xy_P50.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(6,file='xy_[P50].txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(7,file='xy_P90.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(8,file='xy_[P90].txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(9,file='xy_S50.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(11,file='xy_[S50].txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(12,file='xy_S90.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
open(13,file='xy_[S90].txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
!*****
!***Registro de dados Georeferenciados.....***
!*****
do i=1,linmax
do j=1,colmax
if (z(i,j) == -1.0) then
!***Condição ocp_solo(i,j) = -1.0.....***
write(unit=2,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=3,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=4,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=5,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=6,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=7,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=8,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&

```

```

(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=9,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=11,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=12,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
write(unit=13,fmt='(3f12.2)')(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),&
(yglobal - dble(i-1)*dx),-1.0
else if(z(i,j)<> -1.0) then
nno1=fun_ncelula(i,j,colmax,linmax)
do k=1,ntrococ
if (ordetroco(k,3)==nno1) ntroco = ordetroco(k,2)
end do
!***Condição ocp_solo(i,j) <> -1.0.....***
write(unit=2,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
vescoa(ntroco)
write(unit=3,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
vescoa(i)*1000.0/a_bacia(i)
write(unit=4,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
roeht(ntroco)*100.0
write(unit=5,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
mpol_p50(ntroco)
write(unit=6,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
mpol_p50(ntroco)*1000.0/vescoa(ntroco)
write(unit=7,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
mpol_p90(ntroco)
write(unit=8,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
mpol_p90(ntroco)*1000.0/vescoa(ntroco)
write(unit=9,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
msed_p50(ntroco)
write(unit=11,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
msed_p50(ntroco)*1000.0/vescoa(ntroco)
write(unit=12,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
msed_p90(ntroco)
write(unit=13,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(j-1.0)*dx),(yglobal - dble(i-1)*dx),&
msed_p90(ntroco)*1000.0/vescoa(ntroco)
end if
enddo
enddo
close(1)
close(2)
close(3)
close(4)
close(5)
close(6)
close(7)
close(8)
close(9)
close(11)

```

```
close(12)
close(13)
deallocate(div_p0, div_c, &
div_k_usle, div_c_usle, div_p_usle, div_mpol, div_msed)
deallocate(table_p0, table_c,&
table_k_usle, table_c_usle, table_p_usle, table_mpol, table_msed)
deallocate(p0_stat,c_stat, &
k_usle_stat, c_usle_stat, p_usle_stat, mpol_stat, msed_stat)
deallocate(p0_p50,c_p50, &
k_usle_p50, c_usle_p50, p_usle_p50, mpol_p50, msed_p50)
deallocate(p0_p90,c_p90, &
k_usle_p90, c_usle_p90, p_usle_p90, mpol_p90, msed_p90)
deallocate(div_p0_freq, &
div_c_freq, div_k_usle_freq,div_c_usle_freq,div_p_usle_freq,&
div_mpol_freq, div_msed_freq)
deallocate(table_p0_freq, &
table_c_freq, table_k_usle_freq,table_c_usle_freq,&
table_p_usle_freq,table_mpol_freq, table_msed_freq)
deallocate(table_p0_freq_acum, &
table_c_freq_acum, table_k_usle_freq_acum,table_c_usle_freq_acum,&
table_p_usle_freq_acum,table_mpol_freq_acum, table_msed_freq_acum)
deallocate(xy1_z,xy2_z)
deallocate(xy1_solo)
end subroutine sub_estatistica
end module mod_estatistica
```

J.7 ficheiros.f90

O ficheiro ficheiros.f90 corresponde ao módulo mod_ficheiros que contem a subrotina sub_ficheiros(). Esta subrotina tem como função fazer a leitura dos ficheiros de dados.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_ficheiros.....***
!Subrotina : sub_ficheiros - subrotina de carregamento dos...***
!
!               ficheiros de dados.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! amc - grau de humidade do solo, SCS.....***
! p0(i,j) - carga de poluente no solo.....***
! cls_solo(i,x) - classes de solo.....***
! col - número de coluna.....***
! colmax - número máximo de colunas de células.....***
! dx - distância entre centros de gravidade de.....***
!
!       células, m.....***
! dt - intervalo de tempo por passo, s.....***
! i - variável de contagem.....***
! ichuva(j) - intensidade de chuva, mm/h.....***
! j - variável de contagem.....***
! jchuva - número de passos de tempo de chuva.....***
! jmax - número máximo de passos de tempo.....***
! lin - número de linha.....***
! linmax - número máximo de linhas de células.....***
! nclasse - número de classes de solo.....***
! ocp_solo(i,j) - ocupação do solo.....***
! z(i,j) - cotas do centro de gravidade das células, m.....***
!*****
module mod_ficheiros
implicit none
!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision, dimension(:,:),allocatable, public:: z,cls_solo,&
p0medio, p0desvio
integer, dimension(:,:),allocatable, public:: ocp_solo
double precision, dimension(:),allocatable, public::ichuva
double precision, public:: dx, dt,xglobal,yglobal
integer(4), public :: linmax,colmax, jmax, jchuva, nclasse,amc,&
nmcarlo
contains
subroutine sub_ficheiros()
!***Definição de variáveis privadas.....***
integer :: lin,col, i,j,k
!*****
!***Leitura do ficheiro [PROJECTO.TXT].....***
!*****
write(10,*) 'FICHEIRO [PROJECTO.TXT]'
close(1)
open(1,file = 'projecto.txt', status = 'old', &
form = 'formatted', action='read', &
access='sequential',position = 'rewind')
read (unit=1,fmt= *) linmax
linmax = int(linmax)
write(unit=10,fmt='(a70,i5)')      '* linmax - número máximo de &

```

```

linhas na bacia hidrográfica (...):',linmax
read (unit=1,fmt= *) colmax
colmax = int(colmax)
write(unit=10,fmt='(a70,i5)') '* colmax - número máximo de &
colunas na bacia hidrográfica (...):',colmax
read (unit=1,fmt= *) jchuva
jchuva = int(jchuva)
write(unit=10,fmt='(a70,i5)') '* jchuva - número passos de &
tempo de chuva (...):',jchuva
read (unit=1,fmt= *) dx
dx = dble(dx)
write(unit=10,fmt='(a70,f12.2)') '* dx - espaço entre centros &
de gravidade de células (m):',dx
read (unit=1,fmt= *) dt
dt = dble(dt)
write(unit=10,fmt='(a70,f12.2)') '* dt - intervalo de tempo &
(s):',dt
read (unit=1,fmt=*) nclasse
nclasse = int(nclasse)
write(unit=10,fmt='(a70,i3)') '* nclasse - número de classes &
de solo: ',nclasse
read (unit=1,fmt=*) amc
amc = int(amc)
write(unit=10,fmt='(a70,i3)') '* amc - grau de humidade do &
solo segundo SCS: ',amc
read (unit=1,fmt=*) nmcarlo
nmcarlo = int(nmcarlo)
write(unit=10,fmt='(a70,i12)') '* nmcarlo - número de ciclos &
do método de Monte Carlo: ',nmcarlo
read (unit=1,fmt=*) xglobal
write(unit=10,fmt='(a70,f20.0)') '* xglobal - coordenada global &
xx da 1a. célula da bacia hidrográfica: ',xglobal
read (unit=1,fmt=*) yglobal
write(unit=10,fmt='(a70,f20.0)') '* yglobal - coordenada global &
yy da 1a. célula da bacia hidrográfica: ',yglobal
close(1)
!*****
!***Leitura do ficheiro [ICHUVA.TXT]*****
!*****
write(10,*)
write(10,*) 'FICHEIRO [ICHUVA.TXT]'
close(1)
open(1,file='ichuva.txt', status = 'old', &
form = 'formatted', action='read',&
access='sequential',position = 'rewind',&
blank='zero')
if(.not. allocated(ichuva)) allocate (ichuva(jchuva))
write(unit=10,fmt=*) '* Intensidade da chuva (mm/h)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====',
write(unit=10,fmt='(5x,a10,a,a12)') ' j ', '- ',ichuva(j)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====',
do j = 1,jchuva
read (unit = 1,fmt=*) ichuva(j)
ichuva(j) = dble(ichuva(j))
write(unit=10,fmt='(5x,i10,a,f12.2)') j, '- ',ichuva(j)
end do
close(1)
!***Leitura do ficheiro [XYZ.TXT]*****
write(10,*)
write(10,*) 'FICHEIRO [XYZ.TXT]'
close(1)

```

```

open(1,file='xyz.txt', status = 'old', &
form = 'formatted', action='read', &
access='sequential',position = 'rewind')
open(2,file='xy_z.txt',&
form = 'formatted', action='write',&
access='sequential',position = 'rewind')
if(.not. allocated(z)) allocate (z(linmax,colmax))
write(unit=10,fmt=*) '* Topografia da Bacia Hidrográfica (m)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
write(unit=10,fmt='(5x,5a,a,5a,9a)') ' i ', '- ', ' j ', '- ', &
' z(i,j)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
do lin = 1,linmax
read (unit = 1,fmt=*) (z(lin,col),col=1,colmax)
do col = 1,colmax
z(lin,col) = dble(z(lin,col))
write(unit=10,fmt='(5x,i5,a,i5,a,f9.2)') lin, '- ', col, '- ', &
z(lin,col)
!*****
!***Registo de dados Georeferenciados.....***
!*****
!***Condição z(i,j) <> -1.0.....***
if (z(lin,col)<>-1.) write(unit=2,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(col-1.0)*dx),(yglobal - dble(lin-1)*dx),&
z(lin,col)
!***Condição z(i,j) = -1.0.....***
if (z(lin,col) == -1.) write(unit=2,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal + dble(col-1.0)*dx),(yglobal - dble(lin-1)*dx),-1.0
!*****
end do
end do
!***Leitura do ficheiro [OCUPA_SOLO.TXT].....***
write(10,*)
write(10,*) 'FICHEIRO [OCUPA_SOLO.TXT]'
close(1)
close(2)
open(1,file='ocupa_solo.txt', status = 'old',&
form = 'formatted', action='read',&
access='sequential',position = 'rewind')
open(2,file='xy_solo.txt', form = 'formatted',&
action='write',access='sequential',&
position = 'rewind')
if(.not. allocated(ocp_solo)) allocate (ocp_solo(linmax,colmax))
write(unit=10,fmt=*) '* Ocupação do solo - ocp_solo(i,j)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
write(unit=10,fmt='(5x,a5,a,a5,a,a7)') ' i ', '- ', ' j ', '- ', &
' classe'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
do lin = 1,linmax
read (unit = 1,fmt=*) (ocp_solo(lin,col),col=1,colmax)
do col = 1,colmax
ocp_solo(lin,col) = int(ocp_solo(lin,col))
write(unit=10,fmt='(5x,i5,a,i5,a,i3)') lin, '- ', col, '- ', &
ocp_solo(lin,col)
!*****
!***Registo de dados Georeferenciados.....***
!*****
!***Condição ocp_solo(i,j) <> -1.0.....***
if (z(lin,col)<>-1.) write(unit=2,fmt='(2f12.2,i12)')&
(xglobal+ dble(col-1.0)*dx),(yglobal - dble(lin-1)*dx),&
ocp_solo(lin,col)

```

```

!***Condição ocp_solo(i,j) = -1.0.....***
if (z(lin,col) == -1.) write(unit=2,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(col-1.0)*dx),(yglobal - dble(lin-1)*dx),-1.0
!*****
end do
end do
close (1)
!***Leitura do ficheiro [CLASSE_SOLO.TXT].....***
write(10,*)
write(10,*) 'FICHEIRO [CLASSE_SOLO.TXT]'
open(1,file='classe_solo.txt', status = 'old',&
form = 'formatted', action='read',&
access='sequential',position = 'rewind')
if(.not. allocated(cls_solo)) allocate (cls_solo(nclasse,9))
write(unit=10,fmt=*) '* Classes de solo - cls_solo(i,j)'
do i = 1,nclasse
read (unit = 1,fmt=*) (cls_solo(i,j),j=1,9)
do j =1,9
cls_solo(i,j) = dble(cls_solo(i,j))
end do
write(unit=10,fmt=*)' =====&
=====,'
write(unit=10,fmt='(5x,a61,i3)') 'Classe.....&
.....:',i
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f4.0)') ' - CN (Soil Conservation &
Service) - [...].....:',cls_solo(i,1)
write(unit=10,fmt='(5x,a61)') ' - c, Taxa de transporte do &
poluente - [1/mm].....:'
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Valor mais provável....:',cls_solo(i,2)
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Desvio.....:',cls_solo(i,3)
write(unit=10,fmt='(5x,a61)') ' - K (USLE) - Factor de &
Erodibilidade do Solo - [...].....:'
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Valor mais provável....:',cls_solo(i,4)
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Desvio.....:',cls_solo(i,5)
write(unit=10,fmt='(5x,a61)') ' - C (USLE) - Factor de Cultivo &
- [...].....:'
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Valor mais provável....:',cls_solo(i,6)
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Desvio.....:',cls_solo(i,7)
write(unit=10,fmt='(5x,a61)') ' - P (USLE) - Factor de &
Conservação do solo - [...].....:'
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Valor mais provável....:',cls_solo(i,8)
write(unit=10,fmt='(5x,a61,f8.4)') ' - Desvio.....:',cls_solo(i,9)
end do
close(1)
close(2)
!***Leitura do ficheiro [POMEDIO.TXT].....***
write(10,*)
write(10,*) 'FICHEIRO [POMEDIO.TXT]'
open(1,file='p0medio.txt', status = 'old', &
form = 'formatted', action='read', &
access='sequential',position = 'rewind')

open(2,file='xy_p050.txt', form = 'formatted',&
action='write', access='sequential',&
position = 'rewind')
if(.not. allocated(p0medio)) allocate (p0medio(linmax,colmax))
write(unit=10,fmt='(bn,a65)') '* Carga Inicial de Poluentes &
no solo - Valor Médio (g/m2)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
write(unit=10,fmt='(5x,5a,a,5a,9a)') ' i ', '-', ' j ', '-', &
' P0medio(i,j)'

```



```

write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
do lin = 1,linmax
read (unit = 1,fmt=*) (p0medio(lin,col),col=1,colmax)
do col = 1,colmax
p0medio(lin,col) = dble(p0medio(lin,col))
write(unit=10,fmt='(5x,i5,a,i5,a,f9.2)') lin,'-',col,'-',&
p0medio(lin,col)
!*****
!***Registro de dados Georeferenciados.....***
!*****
!***Condição ocp_solo(i,j) <> -1.0.....***
if (z(lin,col)<>-1.) write(unit=2,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(col-1.0)*dx),(yglobal - dble(lin-1)*dx),&
exp(p0medio(lin,col))
!***Condição ocp_solo(i,j) = -1.0.....***
if (z(lin,col) == -1.) write(unit=2,fmt='(3f12.2)')&
(xglobal+ dble(col-1.0)*dx),(yglobal - dble(lin-1)*dx),-1.0
!*****
end do
end do
close(1)
close(2)
!***Leitura do ficheiro [PODESVIO.TXT].....***
write(10,*)
write(10,*) 'FICHEIRO [PODESVIO.TXT]'
open(1,file='p0desvio.txt', status = 'old', &
form = 'formatted', action='read', &
access='sequential',position = 'rewind')
if(.not. allocated(p0desvio)) allocate (p0desvio(linmax,colmax))
write(unit=10,fmt='(bn,a65)') '* Carga Inicial de Poluentes &
no solo - Desvio em relação à média (g/m2)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
write(unit=10,fmt='(5x,5a,a,5a,9a)') ' i ','-', ' j ','-',&
' P0desvio(i,j)'
write(unit=10,fmt='(5x,23a)') '=====
do lin = 1,linmax
read (unit = 1,fmt=*) (p0desvio(lin,col),col=1,colmax)
do col = 1,colmax
p0desvio(lin,col) = dble(p0desvio(lin,col))
write(unit=10,fmt='(5x,i5,a,i5,a,f9.2)') lin,'-',col,'-',&
p0desvio(lin,col)
end do
end do
return
end subroutine sub_ficheiros
end module mod_ficheiros

```

J.8 montecarlo.f90

O ficheiro montecarlo.f90 corresponde ao módulo mod_montecarlo que contem a subrotina sub_montecarlo(). Esta subrotina tem como função fazer a geração de variáveis aleatórias de acordo com uma distribuição lognormal. Também determina a média o desvio padrão, o máximo e o mínimo dos valores gerados.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_diversos - rotinas de apoio, determinação de coordenadas e números de células da bacia hidrográfica.
- Numerical_Libraries - Livraria de matemática da IMSL (Digital Fortran 5.0).

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_montecarlo.....***
!Subrotina : sub_montecarlo - Geração de variáveis aleatórias***
!para a implementação do método de Monte Carlo.....***
!*****
!Definição de variáveis :.....***
! c(:,) - coeficiente de transporte de poluentes, 1/mm.....***
! c_usle(:,) - factor de cultivo da USLE.....***
! desvp - desvio padrão.....***
! drnnof - gerador de variáveis aleatórias de distribuição...***
! Gaussiana.....***
! i - variável de contagem.....***
! k - variável de contagem.....***
! k_usle(:,) - factor de erodibilidade do solo da USLE.....***
! max - valor máximo.....***
! media - valor médio.....***
! min - valor mínimo.....***
! nx - coordenada xx da célula.....***
! ny - coordenada yy da célula.....***
! p_usle - factor de prática de utilização do solo da USLE...***
! P0(:,) - carga inicial de poluente sobre a bacia, g/m2....***
!*****
module mod_montecarlo
use Numerical_Libraries
use mod_ficheiros
use mod_diversos
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordemtroco
implicit none
!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision, dimension (:,:),allocatable,public :: p0, c,&
k_usle, c_usle, p_usle
double precision,dimension (:),allocatable,public :: p0_max,&
c_max,k_usle_max,c_usle_max,p_usle_max, n_nmcarlo
double precision,dimension (:),allocatable,public :: p0_min,&
c_min, k_usle_min, c_usle_min, p_usle_min
double precision,dimension (:,:),allocatable, public :: table_p0,&
table_c, table_k_usle, table_c_usle, table_p_usle
double precision,dimension (:,:),allocatable,public :: p0_media,&
c_media, k_usle_media, c_usle_media, p_usle_media
double precision,dimension (:,:),allocatable,public :: p0_dpadrao,&

```

```

c_dpadroao, k_usle_dpadroao, c_usle_dpadroao, p_usle_dpadroao
contains
subroutine sub_montecarlo()
!***Definição de variáveis privadas.....***
external  drnlnl
integer :: i, j, k, nx, ny, n, n_table
double precision :: p0_m, p0_dp, c_m, c_dp, k_usle_m, &
k_usle_dp, c_usle_m, c_usle_dp, p_usle_m, p_usle_dp
double precision, dimension (:), allocatable :: p0_al, &
c_al, k_usle_al, c_usle_al, p_usle_al
!***.....***
if(.not. allocated(p0)) allocate (p0(ntrococ,nmcarlo))
if(.not. allocated(p0_media)) allocate (p0_media(ntrococ,20))
if(.not. allocated(p0_dpadroao)) allocate (p0_dpadroao(ntrococ,20))
if(.not. allocated(p0_max)) allocate (p0_max(ntrococ))
if(.not. allocated(p0_min)) allocate (p0_min(ntrococ))
if(.not. allocated(p0_al)) allocate (p0_al(nmcarlo))
!***.....***
if(.not. allocated(c)) allocate (c(ntrococ,nmcarlo))
if(.not. allocated(c_media)) allocate (c_media(ntrococ,20))
if(.not. allocated(c_dpadroao)) allocate (c_dpadroao(ntrococ,20))
if(.not. allocated(c_max)) allocate (c_max(ntrococ))
if(.not. allocated(c_min)) allocate (c_min(ntrococ))
if(.not. allocated(c_al)) allocate (c_al(nmcarlo))
!***.....***
if(.not. allocated(k_usle)) allocate (k_usle(ntrococ,nmcarlo))
if(.not. allocated(k_usle_media)) allocate (k_usle_media(ntrococ,20))
if(.not. allocated(k_usle_dpadroao)) allocate (k_usle_dpadroao(ntrococ,20))
if(.not. allocated(k_usle_max)) allocate (k_usle_max(ntrococ))
if(.not. allocated(k_usle_min)) allocate (k_usle_min(ntrococ))
if(.not. allocated(k_usle_al)) allocate (k_usle_al(nmcarlo))
!***.....***
if(.not. allocated(c_usle)) allocate (c_usle(ntrococ,nmcarlo))
if(.not. allocated(c_usle_media)) allocate (c_usle_media(ntrococ,20))
if(.not. allocated(c_usle_dpadroao)) allocate (c_usle_dpadroao(ntrococ,20))
if(.not. allocated(c_usle_max)) allocate (c_usle_max(ntrococ))
if(.not. allocated(c_usle_min)) allocate (c_usle_min(ntrococ))
if(.not. allocated(c_usle_al)) allocate (c_usle_al(nmcarlo))
!***.....***
if(.not. allocated(p_usle)) allocate (p_usle(ntrococ,nmcarlo))
if(.not. allocated(p_usle_media)) allocate (p_usle_media(ntrococ,20))
if(.not. allocated(p_usle_dpadroao)) allocate (p_usle_dpadroao(ntrococ,20))
if(.not. allocated(p_usle_max)) allocate (p_usle_max(ntrococ))
if(.not. allocated(p_usle_min)) allocate (p_usle_min(ntrococ))
if(.not. allocated(p_usle_al)) allocate (p_usle_al(nmcarlo))
!***.....***
if(.not. allocated(n_nmcarlo)) allocate (n_nmcarlo(20))
!***.....***
write(*,*) '06/12 - Geracao de variaveis aleatorias - Metodo de Monte Carlo...'
!***Carga de Poluente sobre a Bacia Hidrográfica.....***
do i=1, ntrococ
!***Determinação da coordenada da célula.....***
call sub_ccelula(ordemtroco(i,3), colmax, linmax, nx, ny)
!***Valor médio = Valor mais provável.....***
P0_m = p0medio(nx,ny)
c_m = cls_solo(ordemtroco(i,5),2)
k_usle_m = cls_solo(ordemtroco(i,5),4)
c_usle_m = cls_solo(ordemtroco(i,5),6)
p_usle_m=cls_solo(ordemtroco(i,5),8)
!***Desvio = 3*Desvio Padrão.....***
P0_dp = p0desvio(nx,ny)

```

```

c_dp = cls_solo(ordetroco(i,5),3)
k_usle_dp = cls_solo(ordetroco(i,5),5)
c_usle_dp = cls_solo(ordetroco(i,5),7)
p_usle_dp= cls_solo(ordetroco(i,5),9)
!***Valor Máximo.....***
p0_max(i) = 0.0
c_max(i) = 0.0
k_usle_max(i) = 0.0
c_usle_max(i) = 0.0
p_usle_max(i) = 0.0
!***Valor Mínimo.....***
p0_min(i) = 1.0e20
c_min(i) = 1.0e20
k_usle_min(i) = 1.0e20
c_usle_min(i) = 1.0e20
p_usle_min(i) = 1.0e20
!*****
!***Geração de variáveis aleatórias com distribuição.....***
!***LogNormal.....***
!*****
call drnlnl(nmcarlo,p0_m,p0_dp,p0_al)
call drnlnl(nmcarlo,c_m,c_dp,c_al)
call drnlnl(nmcarlo,k_usle_m,k_usle_dp,k_usle_al)
call drnlnl(nmcarlo,c_usle_m,c_usle_dp,c_usle_al)
call drnlnl(nmcarlo,p_usle_m,p_usle_dp,p_usle_al)
!*****
do j=1, nmcarlo
!*****
!***Distribuição LogNormal***
!*****
p0(i,j)=p0_al(j)
c(i,j) = c_al(j)
k_usle(i,j) = k_usle_al(j)
c_usle(i,j) = c_usle_al(j)
p_usle(i,j) = p_usle_al(j)
if(p0(i,j) > p0_max(i)) p0_max(i) = p0(i,j)
if(c(i,j) > c_max(i)) c_max(i) = c(i,j)
if(k_usle(i,j) > k_usle_max(i)) k_usle_max(i) = k_usle(i,j)
if(c_usle(i,j) > c_usle_max(i)) c_usle_max(i) = c_usle(i,j)
if(p_usle(i,j) > p_usle_max(i)) p_usle_max(i) = p_usle(i,j)
if(p0(i,j) < p0_min(i)) p0_min(i) = p0(i,j)
if(c(i,j) < c_min(i)) c_min(i) = c(i,j)
if(k_usle(i,j) < k_usle_min(i)) k_usle_min(i) = k_usle(i,j)
if(c_usle(i,j) < c_usle_min(i)) c_usle_min(i) = c_usle(i,j)
if(p_usle(i,j) < p_usle_min(i)) p_usle_min(i) = p_usle(i,j)
!*****
!***Determinação Estatística da Amostra.....***
!***nmcarlo é dividido em 20 valores.....***
!*****
if(j==1) then
n=1
n_table = int(n*nmcarlo/20)
end if
if(j == n_table) then
n_nmcarlo(n) = j
do k = 1,j
if (k==1) then
p0_media(i,n) = p0(i,k)
c_media(i,n) = c(i,k)
k_usle_media(i,n) = k_usle(i,k)
c_usle_media(i,n) = c_usle(i,k)

```

```

p_usle_media(i,n) = p_usle(i,k)
end if
if(k>1) then
p0_media(i,n) = p0_media(i,n) + p0(i,k)
c_media(i,n) = c_media(i,n) + c(i,k)
k_usle_media(i,n) = k_usle_media(i,n) + k_usle(i,k)
c_usle_media(i,n) = c_usle_media(i,n) + c_usle(i,k)
p_usle_media(i,n) = p_usle_media(i,n) + p_usle(i,k)
end if
end do
p0_media(i,n) = p0_media(i,n)/dbble(j)
c_media(i,n) = c_media(i,n)/dbble(j)
k_usle_media(i,n) = k_usle_media(i,n)/dbble(j)
c_usle_media(i,n) = c_usle_media(i,n)/dbble(j)
p_usle_media(i,n) = p_usle_media(i,n)/dbble(j)
p0_dpadrao(i,n) = 0.0
c_dpadrao(i,n) = 0.0
k_usle_dpadrao(i,n) = 0.0
p_usle_dpadrao(i,n) = 0.0
do k =1,j
p0_dpadrao(i,n) = p0_dpadrao(i,n) + (p0(i,k) - p0_media(i,n))**2.0
c_dpadrao(i,n) = c_dpadrao(i,n) + (c(i,k) - c_media(i,n))**2.0
k_usle_dpadrao(i,n) = k_usle_dpadrao(i,n) + ( k_usle(i,k) - k_usle_media(i,n))**2.0
c_usle_dpadrao(i,n) = c_usle_dpadrao(i,n) + ( c_usle(i,k) - c_usle_media(i,n))**2.0
p_usle_dpadrao(i,n) = p_usle_dpadrao(i,n) + ( p_usle(i,k) - p_usle_media(i,n))**2.0
end do
p0_dpadrao(i,n) = sqrt(p0_dpadrao(i,n)/(dbble(j)-1.0))
c_dpadrao(i,n) = sqrt(c_dpadrao(i,n)/(dbble(j)-1.0))
k_usle_dpadrao(i,n) = sqrt(k_usle_dpadrao(i,n)/(dbble(j)-1.0))
c_usle_dpadrao(i,n) = sqrt(c_usle_dpadrao(i,n)/(dbble(j)-1.0))
p_usle_dpadrao(i,n) = sqrt(p_usle_dpadrao(i,n)/(dbble(j)-1.0))
n = n+1
n_table = int(n*nmcarlo/20)
end if
end do
end do
deallocate(cls_solo,p0medio, p0desvio)
deallocate(p0_al,c_al, k_usle_al, c_usle_al, p_usle_al)
return
end subroutine sub_montecarlo
end module mod_montecarlo

```

J.9 MPDifusa.f90

O ficheiro MPDifusa.f90 corresponde ao programa principiapl, prog_MPDifusa. A partir daqui são chamadas as rotinas que determinam a poluição difusa. A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_transp_poluentes - contem uma rotina de gestão da geração e balanço de poluentes na bacia hidrográfica.
- mod_transp_sedimentos - contem uma rotina de gestão da geração e balanço de sedimentos na bacia hidrográfica.
- mod_bacia - Determina a área da bacia hidrográfica em cada célula.
- mod_estatistica - módulo para análise estatística das variáveis aleatórias geradas pelo método de Monte Carlo.
- mod_montecarlo - Gerador de variáveis aleatórias para o método de Monte Carlo.

```
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Dissertação : Modelação da Poluição Difusa.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Programa : pro_mpdifusa.....***
!Nota : Desenvolvimento de modelo de determinação da poluição***
!numa bacia hidrográfica, associado a uma chuvada. Os métodos***
!utilizados a determinação dos diversos componentes, são :...***
!- Chuva efectiva - método desenvolvido pelo Soil.....***
!  Conservation Service.....***
!       $Q = (P-Ia)^2 / (P-Ia+S)$ .....***
!- Escoamento - modelo de onda cinemática.....***
!       $dQ/dx + dA/dt = q$ .....***
!- Poluentes - método proposto por Wanielista, que assemelha.***
!  o fenómeno de transporte de poluentes a uma reacção de 1a.***
!  ordem, em função do excesso hídrico.....***
!       $(P_0-P) = P_0(1-\exp(-cQ))$ .....***
!- Sedimentos (erosão) - Equação Fundamental da Perda de Solo***
!  desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965), adaptada para.***
!  responder a uma chuvada e à erosão provocada pelo.....***
!  escoamento superficial (Foster et al.,1982).....***
!       $E = R K L S C P$ .....***
!- Produção de sedimentos - a quantidade de sedimentos que...***
!  é transportada para o exterior da bacia foi determinada...***
!  pela expressão desenvolvida por Roehl (1962).....***
!       $\log(Cps) = 1,714 - 0,339\log(Ab)$ .....***
!*****
program pro_mpdifusa
***Modelo de hidrocinemática.....***
use mod_escoamento
***Modelo de geração e transporte de poluentes.....***
use mod_transp_poluentes
***Modelo de geração e transporte de sedimentos.....***
use mod_transp_sedimentos
```

```

!***Modulo de geração de variáveis aleatórias para a.....***
!implementação do método de Monte Carlo.....***
use mod_montecarlo
use mod_estatistica
use mod_bacia
implicit none
close(10)
open(10,file='tmp.txt', &
      form = 'formatted', action='write', &
      access='sequential',position ='rewind')
write (*,*) 'FACULDADE DE CIENCIAS E TECNOLOGIA da UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA'
write (*,*) 'Mestrado em Engenharia Sanitaria'
write (*,*)
write (*,*) 'Por          : Davide Santos, 2000'
write (*,*) 'Orientador : Prof. Amilcar Ambrosio'
write (*,*)
write (*,*) 'MPDifusa - MODELO DE POLUICAO DIFUSA'
write (*,*) '===== '
write (*,*)

      call sub_escoamento()
      call sub_montecarlo()
      call sub_transp_poluentes()
      call sub_transp_sedimentos()
      call sub_estatistica()
close(10)
write (*,*) 'Fim da Sessao...'
pause
stop
end program pro_mpdifusa

```

J.10 no1no2.f90

O ficheiro no1no2.f90 corresponde ao módulo mod_no1no2 que contem a subrotina sub_no1no2(). Esta subrotina tem como função determinar o número dos nós de montante e jusante de cada troço de linha. O método corresponde a verificar qual das células contígua à célula em estudo tem maior declividade positiva. Caso não encontre cria nós fictícios de numeração negativa.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_diversos - rotinas de apoio, determinação de coordenadas e números de células da bacia hidrográfica.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_no1no2.....***
!Subrotina : sub_no1no2 - subrotina para determinação das...***
!linhas de água.....***
!***Nota :.....***
! MATRIZES [NO1NO2] e [TRCNO1NO2] - criação dos vectores que...***
! definem o escoamento na bacia hidrográfica.....***
! [no1][no2][ltroco][s0].....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! celula - número de célula.....***
! la - comprimento da linha de água, m.....***
! ltroco - comprimento do troco.....***
! n1x - coordenada xx do nó 1.....***
! n1y - coordenada yy do nó 1.....***
! n2x - coordenda xx do nó 2.....***
! n2y - coordenada yy do nó 2.....***
! no1 - número do nó 1 do troço.....***
! no2 - número do nó 2 do troço.....***
! nofct - número do nó fictício.....***
! no1no2(:, :) - matriz que define os nós dos troços.....***
! nx - número de linhas.....***
! ny - número de colunas.....***
! s0 - declividade do solo, m/m.....***
! s1 - variável auxiliar para a declividade do solo, m/m....***
! trcno1no2(:, :) - matriz que define os comprimentos.....***
!
! e declividades dos troços.....***
! ntroc - número de troco.....***
! z(:, :) - matriz da altimetria da bacia.....***
!
! hidrográfica, m.....***
! z1 - cota do nó 1, m.....***
! z2 - cota do nó 2, m.....***
!*****
module mod_no1no2
use mod_ficheiros
use mod_diversos

```



```

implicit none
!***Definição de Variáveis Públicas.....***
double precision, dimension(:,:),allocatable, public ::trcno1no2
integer, dimension(:,:),allocatable, public :: no1no2
integer, public :: ntrococ
contains
subroutine sub_no1no2()
!***Definição de Variáveis Privadas.....***
integer :: nx, ny,troco
integer :: n1x, n1y, n2x, n2y, no1, no2, nofct
double precision :: ltroco, z1, z2, s0, s1, la
!*****
!***Definição das matrizes de cálculo de caudais.....***
!*****
troco = linmax*colmax
if(.not. allocated(no1no2)) allocate (no1no2(troco,2))
if(.not. allocated(trcno1no2)) allocate (trcno1no2(troco,2))
!*****
!***Criação das matrizes [no1no2] e [trcno1no2].....***
!*****
!***Matriz[no1no2].....***
!***1a. coluna - número do nó a montante do troço.....***
!***2a. coluna - número do nó a jusante do troço.....***
!***Matriz[trcno1no2].....***
!***1a. coluna - comprimento do troço.....***
!***2a. coluna - declividade do troço.....***
!*****
!***NOTAS:.....***
!***A análise das células é feita da esquerda para.....***
!a direita e de cima para baixo.....***
!***O modelo permite mais do que uma saída de água.....***
!da zona em estudo. Se considerarmos uma albufeira,.....***
!todas as células que fazem fronteira com esta são.....***
!potenciais células de fim de troço.....***
!*Para apoio ao cálculo foram considerados troços.....***
!fictícios a partirem do nós destas células terminais.....***
!*Foi adoptada para estes a menor declividade dos.....***
!troços a montante.....***
!*Este procedimento tem por objectivo obter os.....***
!hidrogramas a jusante do nó destas células.....***
!*****
ntrococ = 0
nofct = 0
do nx = 1, linmax
do ny = 1, colmax
s0 = -100.
z1 = z(nx,ny)
!*****
!***Cenário #1 - Canto Superior Esquerdo.....***
!*****
if (ny == 1 .and. nx == 1 .and. z1<> -1.)then
!***1a. hipotese.....***
z2 = z(nx,ny+1)
la = dx
if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
if (z2== -1.) s1 = -100.
if (s1 > s0) ltroco = la
if (s1 > s0) n2x = nx
if (s1 > s0) n2y = ny+1
if (s1 > s0) s0 = s1
!***2a. hipotese.....***

```

```

      z2 = z(nx+1,ny+1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***3a. hipotese.....***
      z2 = z(nx+1,ny)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !*****
      !***Criação de um nó fictício para.....***
      !a definição de troço fictício.....***
      !*****
      if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntrococos = ntrococos + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
        no2 = nofct
        no1no2(ntrococos,1) = no1
        no1no2(ntrococos,2) = no2
        trcno1no2(ntrococos,1) = dx
        trcno1no2(ntrococos,2) = abs(s0)
        if(s0==0.0) trcno1no2(ntrococos,2) = s0 + 0.001
      endif
      !*****
      !***Cenário #2 - Canto Superior Direito.....***
      !*****
      else if(ny == colmax .and. nx==1 .and. z1<> -1.) then
        !***1a. hipotese.....***
        z2 = z(nx,ny-1)
        la = dx
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx
        if (s1 > s0) n2y = ny-1
        if (s1 > s0) s0 = s1
        !***2a. hipotese.....***
        z2 = z(nx+1,ny-1)
        la = dx*sqrt(2.0)
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx+1
        if (s1 > s0) n2y = ny-1
        if (s1 > s0) s0 = s1
        !***3a. hipotese.....***
        z2 = z(nx+1,ny)
        la = dx
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.

```

```

      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !*****
      !***Criação de um nó fictício para.....***
      !a definição de troço fictício.....***
      !*****
      if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntrococos = ntrococos + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
        no2 = nofct
        no1no2(ntrococos,1) = no1
        no1no2(ntrococos,2) = no2
        trcno1no2(ntrococos,1) = dx
        trcno1no2(ntrococos,2) = abs(s0)
      if(s0==0.0) trcno1no2(ntrococos,2) = s0 + 0.001
    endif

    !*****
    !***Cenário #3 - Canto Inferior Esquerdo.....***
    !*****
    else if(ny == 1 .and. nx==linmax .and. z1<> -1.) then
      !***1a. hipotese.....***
      z2 = z(nx-1,ny)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx-1
      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***2a. hipotese.....***
      z2 = z(nx-1,ny+1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx-1
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***3a. hipotese.....***
      z2 = z(nx,ny+1)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !*****
      !***Criação de um nó fictício para.....***
      !a definição de troço fictício.....***
      !*****
      if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntrococos = ntrococos + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny

```

```

      no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
      no2 = nofct
      no1no2(ntrocos,1) = no1
      no1no2(ntrocos,2) = no2
      trcno1no2(ntrocos,1) = dx
trcno1no2(ntrocos,2) = abs(s0)
if(s0==0.0) trcno1no2(ntrocos,2) = s0 + 0.001
endif

!*****
!***Cenário #4 - Canto Inferior Direito.....***
!*****
else if(ny == colmax .and. nx==linmax .and. z1<> -1.) then
  !***1a. hipotese.....***
  z2 = z(nx-1,ny)
  la = dx
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx-1
  if (s1 > s0) n2y = ny
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !***2a. hipotese.....***
  z2 = z(nx-1,ny-1)
  la = dx*sqrt(2.0)
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx-1
  if (s1 > s0) n2y = ny-1
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !***3a. hipotese.....***
  z2 = z(nx,ny-1)
  la = dx
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx
  if (s1 > s0) n2y = ny-1
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !*****
  !***Criação de um nó fictício para.....***
  !a definição de troço fictício.....***
  !*****
  if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
    ntrocos = ntrocos + 1
    nofct = nofct-1
    n1x = nx
    n1y = ny
    no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
    no2 = nofct
    no1no2(ntrocos,1) = no1
    no1no2(ntrocos,2) = no2
    trcno1no2(ntrocos,1) = dx
trcno1no2(ntrocos,2) = abs(s0)
if(s0==0.0) trcno1no2(ntrocos,2) = s0 + 0.001
endif

!*****
!***Cenário #5 - Linha Superior.....***
!*****
else if(ny <> 1 .and. ny <> colmax .and. &
nx == 1 .and. z1<> -1.) then

```

```

      !***1a. hipotese.....***
      z2 = z(nx,ny-1)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx
      if (s1 > s0) n2y = ny-1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***2a. hipotese.....***
      z2 = z(nx+1,ny-1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny-1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***3a. hipotese.....***
      z2 = z(nx+1,ny)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***4a. hipotese.....***
      z2 = z(nx+1,ny+1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***5a. hipotese.....***
      z2 = z(nx,ny+1)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !*****
      !***Criação de um nó fictício para.....***
      !a definição de troço fictício.....***
      !*****
      if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntroc0s = ntroc0s + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
        no2 = nofct
        no1no2(ntroc0s,1) = no1
        no1no2(ntroc0s,2) = no2
        trcno1no2(ntroc0s,1) = dx
        trcno1no2(ntroc0s,2) = abs(s0)
      if(s0==0.0) trcno1no2(ntroc0s,2) = s0 + 0.001

```

```

endif
!*****
!***Cenário #6 - Linha Inferior.....***
!*****
else if(ny <> 1 .and. ny <> colmax .and. &
nx == linmax .and. z1<> -1.) then
    !***1a. hipotese.....***
    z2 = z(nx,ny-1)
    la = dx
    if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
    if (z2== -1.) s1 = -100.
    if (s1 > s0) ltroco = la
    if (s1 > s0) n2x = nx
    if (s1 > s0) n2y = ny-1
    if (s1 > s0) s0 = s1
    !***2a. hipotese.....***
    z2 = z(nx-1,ny-1)
    la = dx*sqrt(2.0)
    if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
    if (z2== -1.) s1 = -100.
    if (s1 > s0) ltroco = la
    if (s1 > s0) n2x = nx-1
    if (s1 > s0) n2y = ny-1
    if (s1 > s0) s0 = s1
    !***3a. hipotese.....***
    z2 = z(nx-1,ny)
    la = dx
    if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
    if (z2== -1.) s1 = -100.
    if (s1 > s0) ltroco = la
    if (s1 > s0) n2x = nx-1
    if (s1 > s0) n2y = ny
    if (s1 > s0) s0 = s1
    !***4a. hipotese.....***
    z2 = z(nx-1,ny+1)
    la = dx*sqrt(2.0)
    if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
    if (z2== -1.) s1 = -100.
    if (s1 > s0) ltroco = la
    if (s1 > s0) n2x = nx-1
    if (s1 > s0) n2y = ny+1
    if (s1 > s0) s0 = s1
    !***5a. hipotese.....***
    z2 = z(nx,ny+1)
    la = dx
    if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
    if (z2== -1.) s1 = -100.
    if (s1 > s0) ltroco = la
    if (s1 > s0) n2x = nx
    if (s1 > s0) n2y = ny+1
    if (s1 > s0) s0 = s1
    !*****
    !***Criação de um nó fictício para.....***
    !a definição de troço fictício.....***
    !*****
    if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntroc = ntroc + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)

```

```

      no2 = nofct
      no1no2(ntrocos,1) = no1
      no1no2(ntrocos,2) = no2
      trcno1no2(ntrocos,1) = dx
trcno1no2(ntrocos,2) = abs(s0)
if(s0==0.0) trcno1no2(ntrocos,2) = s0 + 0.001
endif
!*****
!***Cenário #7 - Primeira Coluna.....***
!*****
else if(ny == 1 .and. nx <> linmax .and. &
nx <> 1 .and. z1<> -1.) then
  !***1a. hipotese.....***
  z2 = z(nx-1,ny)
  la = dx
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx-1
  if (s1 > s0) n2y = ny
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !***2a. hipotese.....***
  z2 = z(nx-1,ny+1)
  la = dx*sqrt(2.0)
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx-1
  if (s1 > s0) n2y = ny+1
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !***3a. hipotese.....***
  z2 = z(nx,ny+1)
  la = dx
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx
  if (s1 > s0) n2y = ny+1
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !***4a. hipotese.....***
  z2 = z(nx+1,ny+1)
  la = dx*sqrt(2.0)
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx+1
  if (s1 > s0) n2y = ny+1
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !***5a. hipotese.....***
  z2 = z(nx+1,ny)
  la = dx
  if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
  if (z2== -1.) s1 = -100.
  if (s1 > s0) ltroco = la
  if (s1 > s0) n2x = nx+1
  if (s1 > s0) n2y = ny
  if (s1 > s0) s0 = s1
  !*****
  !***Criação de um nó fictício para.....***
  !***definição de troço fictício.....***
  !*****

```

```

      if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntroc = ntroc + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
        no2 = nofct
        no1no2(ntroc,1) = no1
        no1no2(ntroc,2) = no2
        trcno1no2(ntroc,1) = dx
        trcno1no2(ntroc,2) = abs(s0)
        if(s0==0.0) trcno1no2(ntroc,2) = s0 + 0.001
      endif
      !*****
      !***Cenário #8 - Última Coluna.....***
      !*****
      else if(ny == colmax .and. nx <> linmax .and. &
        nx <> 1 .and. z1<> -1.) then
        !***1a. hipotese.....***
        z2 = z(nx-1,ny)
        la = dx
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx-1
        if (s1 > s0) n2y = ny
        if (s1 > s0) s0 = s1
        !***2a. hipotese.....***
        z2 = z(nx-1,ny-1)
        la = dx*sqrt(2.0)
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx-1
        if (s1 > s0) n2y = ny-1
        if (s1 > s0) s0 = s1
        !***3a. hipotese.....***
        z2 = z(nx,ny-1)
        la = dx
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx
        if (s1 > s0) n2y = ny-1
        if (s1 > s0) s0 = s1
        !***4a. hipotese.....***
        z2 = z(nx+1,ny-1)
        la = dx*sqrt(2.0)
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx+1
        if (s1 > s0) n2y = ny-1
        if (s1 > s0) s0 = s1
        !***5a. hipotese.....***
        z2 = z(nx+1,ny)
        la = dx
        if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
        if (z2== -1.) s1 = -100.
        if (s1 > s0) ltroco = la
        if (s1 > s0) n2x = nx+1

```



```

      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !*****
      !***Criação de um nó fictício para.....***
      !a definição de troço fictício.....***
      !*****
      if (s0<= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntrococ = ntrococ + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
        no2 = nofct
        no1no2(ntrococ,1) = no1
        no1no2(ntrococ,2) = no2
        trcno1no2(ntrococ,1) = dx
        trcno1no2(ntrococ,2) = abs(s0)
      if(s0==0.0) trcno1no2(ntrococ,2) = s0 + 0.001
    endif

    !*****
    !***Cenário #9 - Interior da Malha.....***
    !*****
    else if(ny <> 1 .and. ny<> colmax .and. &
    nx <> 1 .and. nx <> linmax .and. z1<> -1.) then
      !***1a. hipotese.....***
      z2 = z(nx-1,ny)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx-1
      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***2a. hipotese.....***
      z2 = z(nx-1,ny+1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx-1
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***3a. hipotese.....***
      z2 = z(nx,ny+1)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***4a. hipotese.....***
      z2 = z(nx+1,ny+1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny+1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***5a. hipotese.....***

```

```

      z2 = z(nx+1,ny)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***6a. hipotese.....***
      z2 = z(nx+1,ny-1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx+1
      if (s1 > s0) n2y = ny-1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***7a. hipotese.....***
      z2 = z(nx,ny-1)
      la = dx
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx
      if (s1 > s0) n2y = ny-1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !***8a. hipotese.....***
      z2 = z(nx-1,ny-1)
      la = dx*sqrt(2.0)
      if (z2<> -1.) s1 = (z1-z2)/la
      if (z2== -1.) s1 = -100.
      if (s1 > s0) ltroco = la
      if (s1 > s0) n2x = nx-1
      if (s1 > s0) n2y = ny-1
      if (s1 > s0) s0 = s1
      !*****
      !***Criação de um nó fictício para.....***
      !a definição de troço fictício.....***
      !*****
      if (s0 <= 0.0 .and. z1<>-1.) then
        ntrococ = ntrococ + 1
        nofct = nofct-1
        n1x = nx
        n1y = ny
        no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)
        no2 = nofct
        no1no2(ntrococ,1) = no1
        no1no2(ntrococ,2) = no2
        trcno1no2(ntrococ,1) = dx
        trcno1no2(ntrococ,2) = abs(s0)
      if(s0==0.0) trcno1no2(ntrococ,2) = s0 + 0.001
    endif
  endif
  !*****
  !***Registo dos dados nas matrizes [no1no2] e [trcno1no2]***
  !*****
  if (s0 > 0.0 .and. z1 <> -1.) then
    ntrococ = ntrococ + 1
    n1x = nx
    n1y = ny
    no1 = fun_ncelula(n1x,n1y,colmax,linmax)

```

```
      no2 = fun_ncelula(n2x,n2y,colmax,linmax)
      no1no2(ntrocos,1) = no1
      no1no2(ntrocos,2) = no2
      trcno1no2(ntrocos,1) = ltroco
      trcno1no2(ntrocos,2) = s0
    endif
  end do
end do
return
end subroutine sub_no1no2
end module mod_no1no2
```

J.11 ordentroco.f90

O ficheiro ordentroco.f90 corresponde ao módulo mod_ordentroco que contem a subrotina sub_ordentroco(). Esta subrotina tem como função determinar o número de ordem de cada troço da bacia hidrográfica. O método corresponde a somar (1) ao maior número de ordem dos troços afluentes à célula.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_diversos - Rotinas de apoio, determinação de coordenadas e números de células da bacia hidrográfica.
- mod_no1no2 - Determina a numeração dos nós dos troços de linha de água.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_ordentroco.....***
!Subrotina : sub_ordentroco - determinação do número de.....***
!ordem dos troços.....***
!****Nota :.....***
!MATRIZ [ORDEMTROCO]- criação da matriz [ordentroco].....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! col - número de coluna.....***
! conta - variável auxiliar.....***
! i - variável auxiliar.....***
! j - variável auxiliar.....***
! lin - número de linha.....***
! ntrococ - número de troços.....***
! rec - número de registos.....***
! ordem - número de ordem.....***
! ordentroco(:, :) - matriz a determinar.....***
! ordentrocoaux(:, :) - matriz de cálculo auxiliar.....***
! ver - variável de verificação.....***
!*****
module mod_ordentroco
use mod_ficheiros
use mod_diversos
use mod_no1no2
implicit none
integer, dimension(:, :), allocatable, public :: ordentroco
contains
subroutine sub_ordentroco()
integer, dimension(:, :), allocatable :: ordentrocoaux
integer :: ordem, i, j, nx, ny
integer :: rec, conta, ver, lin, col
!*****
!***Definição das matrizes.....***
!*****
if(.not. allocated(ordentroco)) allocate (ordentroco(ntrococ,6))

```

```

if(.not. allocated(ordentrocoaux)) allocate &
(ordentrocoaux(ntrocos,3))
!*****
!***Criação das matrizes [ordentroco] e [ordentrocoaux].....***
!*****
!***Matriz [ordentroco].....***
!***1a. coluna - número de ordem do troco.....***
!***2a. coluna - número do troço.....***
!***3a. coluna - número do nó 1.....***
!***4a. coluna - número do nó 2.....***
!***5a. coluna - classificação do solo para o nó 1.....***
!***6a. coluna - classificação do solo para o nó 2.....***
!***Matriz [ordentrocoaux]*****
!***1a. coluna - número do nó 1.....***
!***2a. coluna - número de nó 2.....***
!***3a. coluna - ordem do troço.....***
!***4a. coluna - classificação do solo para o nó 1.....***
!***5a. coluna - classificação do solo para o nó 2.....***
!*****
!***Determinação do número de ordem da linha de água.....***
!***Método : Para a determinação do número de ordem.....***
!é verificado se o número do nó 1 do troço a jusante.....***
!coincide com o número do nó 2 do troço a montante.....***
!por cada vez que é determinado a ordem dos troços a montante***
!o número de ordem a jusante é igual ao maior número de ordem***
!a montante adicionado de um (1).....***
!*****
!***Criação da matriz [ordentrocoaux].....***
!*****
do i =1,ntrocos
ordentrocoaux(i,1) = no1no2(i,1)
ordentrocoaux(i,2) = no1no2(i,2)
ordentrocoaux(i,3) = 0
end do
!*****
!***Determinação dos números de ordem dos troços.....***
!*****
do i = 1, ntrocos
!*****
!***Determinação dos troços com número de ordem no. 1.....***
!*****
        conta = 0
        do j = 1, ntrocos
            if (ordentrocoaux(j,2) == ordentrocoaux(i,1)) then
                conta = 1
            end if
        end do
        if (conta==0) then
            ordentrocoaux(i,3) = 1
        end if
        conta = 0
    end do
!*****
!***Determinação dos troços com número de ordem.....***
!superior a 1.....***
!*****
ver=1
do while(ver<>0)
ver = 0
do i = 1,ntrocos
do j = 1,ntrocos

```

```

        if (ordemtrocoaux(j,1) == ordemtrocoaux(i,2)) then
            if (ordemtrocoaux(j,3) <= ordemtrocoaux(i,3)) then
                ordemtrocoaux(j,3) = ordemtrocoaux(i,3) + 1
                ver = ver + 1
            end if
        end if
    end do
end do
end do
!*****
!***Criação da matriz [ordemtroco].....***
!*****
rec = 0 !***Contador de registos na matriz [ordemtroco].....***
ver = 1
ordem = 1
do while(ver <> 0)
    ver = 0
    do j = 1, ntrococ
        do i = 1, ntrococ
            if (ordemtrocoaux(i,3) == ordem) then
                rec = rec + 1
                !***Ordem do troço.....***
                ordemtroco(rec,1) = ordem
                !***Número do troço.....***
                ordemtroco(rec,2) = i
                !***Número do nó1 do troço.....***
                ordemtroco(rec,3) = ordemtrocoaux(i,1)
                !***Número do nó2 do troço.....***
                ordemtroco(rec,4) = ordemtrocoaux(i,2)
                !***Classificação do solo no nó 1.....***
                !***Determinação da coordenada da célula.....***
                call sub_ccelula(ordemtrocoaux(i,1), colmax, linmax, nx, ny)
                ordemtroco(rec,5) = ocp_solo(nx, ny)
                !***Classificação do solo no nó 2.....***
                if (ordemtrocoaux(i,2) > 0) then
                    !***Determinação da coordenada da célula.....***
                    call sub_ccelula(ordemtrocoaux(i,2), colmax, linmax, nx, ny)
                    ordemtroco(rec,6) = ocp_solo(nx, ny)
                end if
                ordemtrocoaux(i,3) = 0
                ver = ver + 1
            end if
        end do
    end do
    if (ver == 0 .and. rec <> ntrococ) then
        ver = 1
        ordem = ordem + 1
    end if
end do
deallocate(ordemtrocoaux)
return
end subroutine sub_ordemtroco
end module mod_ordemtroco

```

J.12 Roehl.f90

O ficheiro Roehl.f90 corresponde ao módulo mod_roehl que contem a subrotina sub_roehl(). Esta subrotina tem como função determinar a capacidade de transporte de sedimentos erodidos.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_diversos - rotinas de apoio, determinação de coordenadas e números de células da bacia hidrográfica.
- mod_scs - Método do Soil Conservation Service
- mod_no1no2 - Definição do escoamento entre células
- mod_ordentroco - Definição do número de ordem dos troços
- mod_usle - Equação universal da Perda de Solo (USLE)

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_roehl.....***
!Subrotina : sub_roehl - Modelo de produção de sedimentos...***
!***Nota.....***
!Determinação das capacidade de produção de sedimentos de...***
!acordo com o método de Roehl (1962).....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! i - variável auxiliar.....***
! j - variável auxiliar.....***
! k - variável auxiliar.....***
! logcps - logaritmo do coeficiente da produção de sedimentos***
! cps - coeficiente de produção de sedimentos.....***
!*****
module mod_roehl
!***Módulo do método do Soil Conservation Service.....***
use mod_scs
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do escoamento entre células.....***
use mod_no1no2
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordentroco
!***Módulo da equação universal da perda de solo.....***
use mod_usle
implicit none
!***Definição de variáveis públicas***
double precision, dimension(:),allocatable, public ::roehl
contains
subroutine sub_roehl()

```

```
!***Definição de Variáveis Privadas.....***
double precision ::logcps, cps
Integer :: i,j,k
if(.not. allocated(roehl)) allocate (roehl(ntrocos))
do i=1,ntrocos
!***Determinação do coeficiente de produção de sedimentos....***
logcps = 1.714 - 0.339*log10(a_bacia(i)/1000000.0)
cps = 10.0**logcps/100.0
if (cps >= 1.0) cps = 1.0
if (vescoa(i) < 0.0005) cps = 0.0
roehl(i) = cps
end do
end subroutine sub_roehl
end module mod_roehl
```


J.13 scs.f90

O ficheiro scs.f90 corresponde ao módulo mod_scs que contem a subrotina sub_scs(). Esta subrotina tem como função determinar o excesso hídrico em cada célula.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_scs.....***
!Funções :.....***
!   - fun_chuvae - chuva efectiva.....***
!***Nota :.....***
!- Determinação da chuva efectiva pelo método do Soil.....***
!   Conservation Service.....***
!*****
!Definição de variáveis :.....***
! chuva - precipitação, mm.....***
! chuvae - precipitação efectiva (escoada), mm.....***
! cnum - curva número.....***
! ia - abstracção inicial, mm.....***
! tmp - tempo, h.....***
! s - infiltração potencial, mm.....***
!*****
module mod_scs
implicit none
contains
!*****
!FUN_CHUVAE --> «determinação da chuva efectiva de acordo....***
!com a formulação do Soil Conservation Service.».....***
!*****
function fun_chuvae(chuva,rchuva,cn) result(chuvae)
double precision :: chuva, cn, chuvae, ia, s,rchuva
double precision :: sf, sp, k, i, rchv
!***Determinação da abstracção inicial.....***
if (cn > 75) k = 8.052 - 0.08052*cn
if (cn <= 75 .and. cn > 36) k = 31.394 - 0.391*cn
if (cn <= 36) k = 47.066 - 0.823*cn
if (cn > 65) sp = 60.115 - 0.601*cn
if (cn <= 65) sp = 30.251 - 0.146*cn
sf = sp**2.0/(2*k)
ia = sf/(rchuva/k - 1)
s = 25400.0/cn-254.0
!***Determinação do ia máximo para o cn.....***
if(ia <= 0.0) then
rchv = 0.0
do while (ia < 0.0)
rchv = rchv + 1.0
ia = sf/(rchv/k - 1.0)
end do
end if
!***Determinação da chuva efectiva.....***
chuvae = 0.0
if ((chuva-ia)<= 0.0) then
chuvae = 0.0
else
chuvae = (chuva - ia)**2.0/(chuva-ia+s)
endif

```

```
end function fun_chuvae  
end module mod_scs
```

J.14 transp_poluentes.f90

O ficheiro transp_poluentes.f90 corresponde ao módulo mod_transp_poluentes que contem a subrotina sub_transp_poluentes(). Esta subrotina tem como função gerir o conjunto de rotinas que determinam a geração de poluentes na bacia hidrográfica.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_wanielista - Determina o poluentes lixiviados de acordo com o modelo exponencial.
- mod_balpol - Determina o balanço de poluentes na bacia hidrográfica.
- mod_montecarlo - gerador de variáveis aleatórias de acordo com a distribuição lognormal.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_transp_poluentes.....***
!Subrotina : sub_transp_poluentes - Geração e transporte de..***
!poluentes.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
!*****
module mod_transp_poluentes
!***Módulo que o escoamento pelo modelo de onda cinemática...***
use mod_escoamento
!***Módulo que determina a geração de poluentes.....***
use mod_wanielista
!***Módulo que determina o balanço de massas de poluentes....***
use mod_balpol
use mod_ficheiros
use mod_montecarlo
implicit none
contains
subroutine sub_transp_poluentes()
write(*,*) '07/12 - Determinacao da massa de poluente gerado por celula...'
call sub_wanielista()
write(*,*) '08/12 - Balanco de poluente por sub-bacia...'
call sub_balpol()
end subroutine sub_transp_poluentes
end module mod_transp_poluentes

```

J.15 transp_sedimentos.f90

O ficheiro transp_sedimentos.f90 corresponde ao módulo mod_transp_sedimentos que contém a subrotina sub_transp_sedimentos(). Esta subrotina tem como função gerir o conjunto de rotinas que determinam a geração de sedimentos na bacia hidrográfica.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_usle - Determina a erosão pela equação universal da perda de solo.
- mod_balsed - Determina o balanço de sedimentos na bacia hidrográfica.
- mod_roehl - Determina a capacidade de transporte de poluentes na bacia hidrográfica.

```
!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_transp_sedimentos.....***
!Subrotina : sub_transp_sedimentos - Criação e transporte de.***
!sedimentos.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
!*****
module mod_transp_sedimentos
!***Módulo que determina a erosão associada a uma.....***
!chuvada pela Equação Fundamental da Perda de Solo (USLE),...***
!desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965).....***
use mod_usle
!***Módulo que determina a capacidade de transporte.....***
!de sedimentos de acordo com Roehl (1962).....***
use mod_roehl
!***Módulo que a massa de sedimentos que é transportada para.***
!o exterior da bacia hidrográfica.....***
use mod_balsed
implicit none
contains
subroutine sub_transp_sedimentos()
write(*,*) '09/12 - Determinacao de erosao por sub-bacia - USLE...'
call sub_usle()
write(*,*) '10/12 - Capacidade de transporte de sedimentos - Metodo de Rhoel...'
call sub_roehl()
write(*,*) '11/12 - Balanco dos sedimentos por sub-bacia...'
call sub_balsed()
end subroutine sub_transp_sedimentos
end module mod_transp_sedimentos
```

J.16 usle.f90

O ficheiro usle.f90 corresponde ao módulo mod_usle que contem a subrotina sub_usle(). Esta subrotina tem como função determinar a erosão nas sub-bacias hidrográficas formadas por todas as células. Esta subrotina utiliza a Equação Universal da Perda de Solo (USLE).

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_usle - Determina a erosão pela equação universal da perda de solo.
- mod_balsed - Determina o balanço de sedimentos na bacia hidrográfica.
- mod_scs - Determina o excesso hídrico nas células da bacia hidrográfica.
- mod_no1no2 - Determina a numeração dos nós dos troços de linha de água.
- mod_ordemtroco - Determina o número de ordem dos troços de linha de água.
- mod_bacia - Determina a área da bacia hidrográfica em cada célula.
- mod_montecarlo - Gerador de variáveis aleatórias segundo a distribuição lognormal para o método de Monte Carlo.

```
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_usle.....***
!Subrotina : sub_usle - erosão de acordo com a USLE da USDA..***
!***Nota :.....***
!Determinação da erosão a partir da Equação Universal da....***
!Perda de Solo (USLE - Universal Soil Losse Equation).....***
!desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965).....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! chuva - chuva, cm.....***
! chuva_mm - chuva, cm.....***
! clai - comprimento da linha de água até à célula (i), m...***
! clai_1 - comprimento da linha de água até à célula (i-1), m***
! c_usle - factor de cultivo da USLE.....***
! dt - intervalo de tempo, s.....***
! e_usle(:) - erosão, g/m2.....***
! ichuva_30mn - intensidade de chuva em 30minutos, cm/h.....***
! ichuva_30mn_aux - intensidade de chuva em 30minutos, cm/h...***
! ichuva(:) - intensidade de chuva, mm/h.....***
! k_usle - factor de erodibilidade do solo da USLE.....***
! ls_usle(:) - factor de inclinação-comprimento da USLE.....***
! ltroco - comprimento do troco, m.....***
! m - variável.....***
! p_usle - factor de prática de utilização do solo da USLE...***
! qescoa - caudal máximo escoado, cm/h.....***
! rchuva - factor de erodibilidade da chuva.....***
```

```

! rescoa - factor de erodibilidade do escoamento.....***
! r_usle(:) - factor de erodibilidade da USLE.....***
! stroco - inclinação do troço, %.....***
! t - variável.....***
! tmp - tempo, s.....***
! vescoa - volume escoado, cm.....***
!*****
module mod_usle
!***Módulo do método do Soil Conservation Service.....***
use mod_scs
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordentroco
!***Módulo que determina as características do escoamento....***
use mod_escoamento
!***Módulo de definição do escoamento entre células.....***
use mod_no1no2
!***Módulo que aplica o método de Monte Carlo.....***
use mod_montecarlo
!***Módulo que determina a área por sub-bacia.....***
use mod_bacia
!*****
!***NOTA : A USLE (Universal Soil Losse Equation) foi.....***
!desenvolvida por Wishmeier and Smith (1965) da USDA e.....***
!determina a perda de solo para um ano (tons/ha).....***
!Foster e al. (1997) in Novotny (1995,pp.121-134) propõe uma.***
!alteração à formulação que nos dá a perda de solo para uma.***
!única chuvada (ton/ha).....***
!*****
implicit none
!***Definição de variáveis públicas.....***
double precision, dimension(:),allocatable, public:: l_agua
double precision, dimension(:,:),allocatable, public:: e_usle
contains
subroutine sub_usle()
!***Definição de variáveis privadas..... ***
double precision, dimension(:,:),allocatable:: usle
double precision, dimension(:),allocatable:: ls_usle
double precision :: qescoa, t, tmp, vescoa_aux, chuva_mi,mi_1, &
rchuva, rescoa, chuva_mm, ichuva_30mn,ichuva_30mn_aux,lstroco, &
kusle, cusle, pusle,clai,clai_1,strocoi, strocoi_1,&
s_deltai_1,ki,ci,pi, r_usle
integer :: i,j,k
ichuva_30mn_aux = 0.0
!***Determinação da intensidade de chuva máxima em 30mn.....***
do i=1, jchuva !int((jchuva*dt - 1800)/dt)
chuva_mm = 0.0
do j = i,int(1800/dt)-1
!***valor acumulado da chuva.....***
if (j <= jchuva) chuva_mm = chuva_mm + ichuva(j)*dt/3600.0 !-->(mm)
end do
!***Determinação da Intensidade de chuva para 30min.....***
ichuva_30mn_aux = chuva_mm/0.5 !-->(mm/h)
!***Verificação se é a intensidade superior da chuvada.....***
if (ichuva_30mn_aux >= ichuva_30mn) ichuva_30mn = &
ichuva_30mn_aux !-->(mm/h)
end do
!*****
!***Determinação do factor de energia da chuva (rchuva).....***
!rchuva = (Sum(0.119 + 0.087*log(ichuva(j))*chuva)*ichuva_30mn**

```

```

!*****
rchuva = 0.0
do j = 1,jchuva
chuva = ichuva(j)*dt/(3600.0) !-->(mm)
if(ichuva(j)<= 76.0) rchuva = rchuva + ((0.119 + 0.087*&
log10(ichuva(j)))*chuva)*ichuva_30mn !-->(...)
if(ichuva(j)<= 76.0) rchuva = rchuva + (0.283*chuva)*ichuva_30mn !-->(...)
end do
r_usle = rchuva
!*****
!***Determinação do factor inclinação-comprimento (ls_usle)..***
!*****
!***usle(i,01) - m(i-1).....***
!***usle(i,02) - m(i).....***
!***usle(i,03) - lambda(i-1).....***
!***usle(i,04) - lambda(i).....***
!***usle(i,05) - s(i).....***
!***usle(i,06) - delta(i).....***
!***usle(i,07) - sum(s(i)*delta(i)).....***
!***usle(i,08) - k_usle*areai.....***
!***usle(i,09) - c_usle*areai.....***
!***usle(i,10) - p_usle*areai.....***
!*****
!***Determinação do comprimento da linha de água.....***
!*****
if(.not. allocated(usle)) allocate (usle(ntrococ,10))
if(.not. allocated(a_bacia)) allocate (a_bacia(ntrococ))
if(.not. allocated(ls_usle)) allocate (ls_usle(ntrococ))
if(.not. allocated(l_agua)) allocate (l_agua(ntrococ))
if(.not. allocated(e_usle)) allocate (e_usle(ntrococ,nmcarlo))
do j=1,nmcarlo
clai = 0.0
clai_1 = 0.0
ki = 0.0
ci = 0.0
pi = 0.0
do i =1,ntrococ
!***Linhas com número de ordem igual a 1.....***
if(ordemtroco(i,1)==1) then
!***Determinação do valor de mi_1.....***
mi_1 = 0.0
!***Determinação do comprimento da linha de água (m).....***
ltroco = trcno1no2(ordemtroco(i,2),1) !-->(m)
!***Determinação da inclinação do troço (m/m).....***
strocoi = trcno1no2(ordemtroco(i,2),2)*100.0 !-->(%)
!***Determinação do valor de m.....***
if(strocoi < 1.0) mi = 0.2 !-->(...)
if(strocoi >= 1.0 .and. strocoi < 3.0) mi = 0.3 !-->(...)
if(strocoi >= 3.0 .and. strocoi < 5.0) mi = 0.4 !-->(...)
if(strocoi >= 5.0) mi = 0.5 !-->(...)
usle(i, 1) = mi_1
usle(i, 2) = mi
usle(i, 3) = 0.0 !--> (m)
usle(i, 4) = ltroco !-->(m)
usle(i, 5) = (0.065 + 0.04579*strocoi + 0.0065*strocoi**2.0)
usle(i, 6) = ltroco**(mi+1)/22.10**mi
usle(i, 7) = usle(i,5)*usle(i,6)
usle(i, 8) = k_usle(i,j)*dx**2.0 !-->(...)
usle(i, 9) = c_usle(i,j)*dx**2.0 !-->(...)
usle(i,10) = p_usle(i,j)*dx**2.0 !-->(...)
l_agua(i) = ltroco

```

```

mi_1 = 0.0
mi = 0.0
clai_1 = 0.0
clai = 0.0
ki = 0.0
ci = 0.0
!***Linhas com número de ordem superior a 1.....***
else if(ordemtroco(i,1)<>1) then
  do k = 1,i
    if (ordemtroco(k,4) == ordemtroco(i,3)) then
      if (clai <= usle(k,4)) then
        !***Comprimento da linha água
        clai_1 = usle(k,4)
      clai = clai_1
      !***Determinação da inclinação do troço (m/m).....***
      strocoi_1 = trcnolno2(ordemtroco(k,2),2)*100.0 !-->(%)
      s_deltai_1 = usle(k,7)
      end if
      ki = ki + usle(k, 8)
      ci = ci + usle(k, 9)
      pi = pi + usle(k,10)
    end if
  end do
  !***Determinação do valor de mi_1.....***
  if(strocoi_1 < 1.0) mi_1 = 0.2 !-->(…)
  if(strocoi_1 >= 1.0 .and. strocoi_1 < 3.0) mi_1 = 0.3 !-->(…)
  if(strocoi_1 >= 3.0 .and. strocoi_1 < 5.0) mi_1 = 0.4 !-->(…)
  if(strocoi_1 >= 5.0) mi_1 = 0.5 !-->(…)
  !***Determinação do comprimento da linha de água (m).....***
  ltroco = trcnolno2(ordemtroco(i,2),1) !-->(m)
  clai = clai + ltroco
  !***Determinação da inclinação do troço (m/m).....***
  strocoi = trcnolno2(ordemtroco(i,2),2)*100.0 !-->(%)
! strocoi = datand(trcnolno2(ordemtroco(i,2),2)) !-->(°)
  !***Determinação do valor de mi.....***
  if(strocoi < 1.0) mi = 0.2 !-->(…)
  if(strocoi >= 1.0 .and. strocoi < 3.0) mi = 0.3 !-->(…)
  if(strocoi >= 3.0 .and. strocoi < 5.0) mi = 0.4 !-->(…)
  if(strocoi >= 5.0) mi = 0.5 !-->(…)
  usle(i, 1) = mi_1 !-->(…)
  usle(i, 2) = mi !-->(…)
  usle(i, 3) = clai_1 !--> (m)
  usle(i, 4) = clai !-->(m)
  usle(i, 5) = (0.065 + 0.04579*strocoi + 0.0065*strocoi**2.0)
  usle(i, 6) = (clai**(mi+1) - clai_1**(mi_1+1))/22.10**mi
  usle(i, 7) = s_deltai_1 + usle(i,5)*usle(i,6)
  usle(i, 8) = ki + k_usle(i,j)*dx**2.0 !-->(…)
  usle(i, 9) = ci + c_usle(i,j)*dx**2.0 !-->(…)
  usle(i,10) = pi + p_usle(i,j)*dx**2.0 !-->(…)
l_agua(i) = clai
  mi_1 = 0.0
  mi = 0.0
  clai_1 = 0.0
  clai = 0.0
  ki = 0.0
  ci = 0.0
pi = 0.0
end if
!*****
!***Determinação da erosão (e_usle).....***
!*****

```



```
kusle = usle(i, 8)/a_bacia(i) !-->(...)
cusle = usle(i, 9)/a_bacia(i) !-->(...)
pusle = usle(i,10)/a_bacia(i) !-->(...)
ls_usle(i) = usle(i,7)/usle(i,4)
!***Erosão de acordo com a USLE.....***
e_usle(i,j) = r_usle*kusle*ls_usle(i)*cusle*pusle !-->(ton/ha)
e_usle(i,j) = e_usle(i,j)*0.1 !-->(kg/m2)
end do
end do
deallocate(ichuva, usle, ls_usle)
return
end subroutine sub_usle
end module mod_usle
```

J.17 Wanielista.f90

O ficheiro Wanielista.f90 corresponde ao módulo mod_wanielista que contem a subrotina sub_wanielista(). Esta subrotina tem como função determinar a lixiviação de poluente em todas as células através do modelo exponencial.

A subrotina utiliza os seguintes módulos :

- mod_escoamento - Determina o escoamento em toda a bacia hidrográfica.
- mod_ficheiros - Leitura de ficheiros de dados.
- mod_montecarlo - Gerador de variáveis aleatórias segundo a distribuição lognormal para o método de Monte Carlo.
- mod_diversos - Rotinas de apoio, determinação de coordenadas e números de células.

```

!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_wanielista.....***
!Subrotina : sub_wanielista - Determinação da massa de.....***
!poluente gerada e transportada na bacia hidrográfica de.....***
!acordo com o modelo proposto por Wanielista em função do....***
!excesso hídrico.....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
!*****
module mod_wanielista
!***Módulo que determina as características do escoamento....***
use mod_escoamento
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de rotinas diversas.....***
use mod_diversos
!***Módulo que aplica o método de Monte Carlo.....***
use mod_montecarlo
implicit none
double precision, dimension(:,:),allocatable,public :: mpolacum
contains
subroutine sub_wanielista()
double precision :: qe
integer :: i,j,k,nx,ny
if(.not. allocated(mpolacum)) allocate (mpolacum(ntrococos,nmcarlo))
do j = 1,nmcarlo
do i = 1,ntrococos
qe = chuvaeacum(i)*1000.0 !-->(mm)
mpolacum(i,j) = p0(i,j)*(1.0 - exp(-c(i,j)*qe)) !-->(g/m2)
end do
end do
deallocate(chuvaecum)
return
end subroutine sub_wanielista
end module mod_wanielista

```

J.18 Modelo de Onda Cinemática - Código

O código apresentado neste ponto corresponde ao escoamento distribuído com base no modelo de onda cinemática. Este código não faz parte do programa utilizado na modelação da bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas.

J.18.1 hidrocinematica.f90

O ficheiro hidrocinematica.f90 corresponde ao módulo mod_hidrocinematica que contém a subrotina sub_hidrocinematica(). Esta rotina tem como função resolver o modelo de onda cinemática associado a um escoamento distribuído em toda a bacia hidrográfica.

Com esta rotina geramos os hidrogramas associados ao escoamento em cada célula. Além do caudal é determinada a velocidade e altura de escoamento.

Neste modelo é considerado que a altura de escoamento é uniforme em toda a largura da célula.

```
!*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_hidrocinematica.....***
!Subrotina : sub_hidrocinematica - modelo de escoamento na...***
!
!                bacia hidrográfica.....***
!Nota : Determinação do hidrograma de cheia obedecendo.....***
!ao modelo de onda cinemática :.....***
!
!                 $dQ/dx + dA/dt = q$ .....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! alfa - constante.....***
! amc - grau de humidade do solo.....***
! area - área da célula.....***
! beta - constante.....***
! chuva - precipitação, mm.....***
! chuvaeno1(i,j) - chuva efectiva no nó 1 do troço i no.....***
!
!                tempo j, m.....***
! chuvaeno1acum(i,j) - chuva efectiva acumulada no nó 1.....***
!
!                do troço i no tempo j, m.....***
! cn - curva número do SCS.....***
! colmax - número máximo de colunas.....***
! dt - intervalo de tempo, s.....***
! dx - intervalo de espaço, m.....***
! ichuva(j) - intensidade pluviométrica, m/s.....***
! i - numeração de células.....***
! imax - máximo numero de células.....***
! j - numeração dos intervalos de tempo.....***
! k - variável auxiliar.....***
! ki - variável auxiliar.....***
! kj - variável auxiliar.....***
! jmax - máximo intervalo de tempo.....***
! linmax - numero máximo de linhas.....***
! ltroco - comprimento de troço, m.....***
! nno1 - coeficiente de Manning no nó 1,  $s/m^{1/3}$ .....***
```

```

! no1 - número do nó 1 do troço.....***
! no2 - número do nó 2 do troço.....***
! nx - número de colunas.....***
! ny - número de linhas.....***
! ql - caudal unitário de percurso, m**2/s.....***
! sl - variável auxiliar para a declividade do solo, m/m.....***
! tchuva - tempo de chuva, s.....***
! z(:, :) - matriz da altimetria da bacia hidrográfica, m.....***
!*****
module mod_hidrocinematica
!***Módulo do método do Soil Conservation Service.....***
use mod_scs
!***Módulo que determina o caudal pela onda cinemática.....***
use mod_caudal
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
!***Módulo de definição do escoamento entre células.....***
use mod_no1no2
!***Módulo de definição do número de ordem dos troços.....***
use mod_ordemtroco
implicit none
!***Definição de Variáveis Públicas***
double precision, dimension(:, :), allocatable, public :: u, h, &
q, vescoa, chuvaeno1acum
contains
subroutine sub_hidrocinematica()
!***Definição de Variáveis Privadas***
double precision, dimension(:, :), allocatable :: qno1, qno2, chuvaeno1
double precision :: n, nno1, nno2, area, ltroco, stroco, alfa, &
c, b, chuva, cn, qilj, qilj1, qij1, qlilj, qlilj1, qlilj1
integer :: i, j, k, ki, kj, imax, nx, ny, no1, no2
double precision, parameter :: beta=0.6
!*****
!***Carregamento dos ficheiros de dados [*.TXT] em memória...***
!*****
write(*,*) '01/12 - Leitura dos ficheiros de dados...'
call sub_ficheiros()
!*****
!***Definição dos troços da bacia hidrográfica.....***
!*****
write(*,*) '02/12 - Definicao das linhas de agua...'
call sub_no1no2()
!*****
!***Definição do número de ordem dos troços.....***
!*****
write(*,*) '03/12 - Determinacao do numero de ordem de cada &
linha de agua...'
call sub_ordemtroco()
write(*,*) '04/12 - Determinacao do Escoamento (Q, U e H) - &
Modelo de Onda Cinematica...'
!*****
!***Definição das matrizes de cálculo de caudais.....***
!*****
if(.not. allocated(qno1)) allocate (qno1(ntrocos, jmax))
if(.not. allocated(qno2)) allocate (qno2(ntrocos, jmax))
if(.not. allocated(vescoa)) allocate (vescoa(ntrocos, jmax))
if(.not. allocated(q)) allocate (q(ntrocos, jmax))
if(.not. allocated(chuvaeno1)) allocate (chuvaeno1(ntrocos, jmax))
if(.not. allocated(chuvaeno1acum)) allocate &
(chuvaeno1acum(ntrocos, jmax))
if(.not. allocated(u)) allocate (u(ntrocos, jmax))

```

```

if(.not. allocated(h)) allocate (h(ntroc, jmax))
!*****
!***Caudal por metro linear.....***
!*****
area = dx**2.0 !-->(m^2)
!*****
!***[RESULTA.TXT] - ficheiro onde são registados os.....***
!resultados dos cálculos da ONDA CINEMÁTICA.....***
!*****
chuva = 0.0
do j = 1, jmax
!***valor acumulado da chuva.....***
if (j <= jchuva) chuva = chuva + ichuva(j)*dt/3600.0 !-->(mm)
do i = 1, ntroc
!*****
!***Valores iniciais minimo em todas as Células para garantir***
!a estabilidade do sistema.....***
!*****
qno1(i,j) = 1.0e-20 !-->(m3/s)
qno2(i,j) = 1.0e-20 !-->(m3/s)
if (j <= jchuva) then
!***Chuva efectiva acumulada no Nó 1 do troço i.....***
!***Condição de humidade AMCI.....***
cn = cls_solo(ordetroco(i,5),1)!-->(m)
!***Condição de humidade AMCI.....***
if(amc ==1) cn = 4.2*cn/(10.0 - 0.058*cn)
!***Condição de humidade AMCIII.....***
if(amc ==3) cn = 23.0*cn/(10.0 + 0.13*cn)
chuvaenolacum(i,j) = fun_chuvas(chuva,cn,ichuva(j))/1000.0 !-->(m)
!***Chuva efectiva acumulada no Nó 2 do troço i.....***
!***Condição de humidade AMCI.....***
cn = cls_solo(ordetroco(i,5),1)!-->(m)
!***Condição de humidade AMCI.....***
if(amc ==1) cn = 4.2*cn/(10.0 - 0.058*cn)
!***Condição de humidade AMCIII.....***
if(amc ==3) cn = 23.0*cn/(10.0 + 0.13*cn)
!***Chuva efectiva no nó 1 no intervalo de tempo dt.....***
if (j==1) chuvaenol1(i,j) = chuvaenolacum(i,j) !-->(m)
if (j> 1) chuvaenol1(i,j) = chuvaenolacum(i,j) - &
chuvaenolacum(i,j-1) !-->(m)
if (chuvaenol1(i,j) <= 1.0e-20) chuvaenol1(i,j) = 1.0e-20 !-->(m)
!*****
!***Valor da chuva para controlo do valor da chuva efectiva..***
!***Quando o passo de tempo (j) é superior ao número de.....***
!passos de tempo de de precipitação (jchuva), o valor da.....***
!chuva é zero.....***
!***São atribuidos valores de (1.0e-20 m) para evitar.....***
!instabilização da rotina devido a zeros.....***
!*****
else if (j > jchuva) then
chuvaenol1(i,j) = 1.0e-20 !-->(m)
end if
end do
end do
do j = 1, jmax-1
do i = 1, ntroc
!*****
!***Determinação o Q(i+1,j+1).....***
!*****
!***Determinação do comprimento do troço (m).....***
ltroco = trcno1no2(ordetroco(i,2),1) !-->(m)

```

```

!***Determinação da inclinação do troço (m/m).....***
stroco = trcno1no2(ordemtroco(i,2),2) !-->(m/m)
!***Determinação dos caudais de percurso (m3/m.s).....***
qli1j1 = chuvaeno1(i,j+1)*area/(ltroco*dt) !-->(m3/m.s)
qli1j = chuvaeno1(i,j )*area/(ltroco*dt) !-->(m3/m.s)
do k = 1,i
    !***Caudais de entrada para troços de ordem 1 (m3/s)..***
    if(ordemtroco(i,1)== 1 ) qij1 = 1.0e-20
!*****
!***0 caudal do Nó 1 de um troço de jusante é igual ao.....***
!somatório dos caudais do Nó 2 dos troços a montante.....***
!*****
    if (ordemtroco(k,4) == ordemtroco(i,3)) then
        qij1 = qij1 + qno2(k,j+1) !-->(m3/s)
        qno1(i,j+1) = qij1 !-->(m3/s)
    end if
    !*****
    !***Verificação de estabilidade do sistema.....***
    !***qno1(i,j+1) <> 0.0.....***
    !*****
    if(qij1 < 1.0e-20) qij1 = 1.0e-20 !-->(m3/s)
end do
!***Determinação de Q(i+1,j).....***
qilj = qno2(i,j) !-->(m3/s)
!*****
!***Determinação da largura do canal.....***
!***Condição : troços horizontais ou verticais.....***
if(ltroco == dx) b=ltroco !-->(m)
!***Condição : troços oblíquos.....***
if(ltroco > dx) b=ltroco/2.0 !-->(m)
!*****
!***Determinação de alfa.....***
nno1 = cls_solo(ordemtroco(i,5),2) !-->(s/m^(1/3))
alfa = (nno1*b**(2.0/3.0)/stroco**0.5)**0.6 !-->(s/m^(1/3))

!*****
!***Subrotina para determinação do caudal do nó2 para.....***
!Q(i+1,j+1) através do modelo de onda cinemática :.....***
!.....dQ/dx + dA/dt = q.....***
!***0 modelo utiliza uma primeira iteração de um método.....***
!explicito (esquema linear) para determinar o valor.....***
!final de Q(i+1,j+1) através de um método implícito.....***
!(esquema não linear). (Chow, 1988).....***
!*****
call sub_caudal(alfa,qilj,qij1,qilj1,qli1j,qli1j1,ltroco)
!***Carregamento das matrizes qno1(i,j) e qno2(i,j).....***
qno2(i,j+1) = qilj1 !-->(m3/s)
qno1(i,j+1) = qij1 !-->(m3/s)
qij1 = 1.0e-20 !-->(m3/s)
!*****
!***Carregamento das matrizes de Caudal, Velocidade,.....***
!Altura de escoamento.....***
!*****
vescoa(i,j) = 0.0 !-->(m3)
q(i,j) = qno2(i,j) !-->(m3/s)
if(j==1 ) vescoa(i,j) = q(i,j)*dt !-->(m3)
if(j > 1) vescoa(i,j) = vescoa(i,j-1) + &
(q(i,j-1)+q(i,j))*dt/2.0 !-->(m3)
h(i,j) = alfa*q(i,j)**(3.0/5.0)/b !-->(m)
u(i,j) = q(i,j)/(b*h(i,j))!-->(m/s)
end do

```

```

end do
!*****
close(1)
open(unit=1,file='resulta_q.txt',&
      form = 'formatted', action='write',&
      access='sequential', position = 'rewind')
!*****
!***Registo dos resultados nos ficheiros :.....***
! [RESULTA_Q.TXT], [RESULTA_U.TXT] e [RESULTA_h.TXT] .....***
!*****
!***Definição do Cabeçalho do Ficheiro [RESULTA_Q.TXT] .....***
!*****
write(1,fmt=*) 'CAUDAIS ESCOADOS - (m3/s)'
write(1,fmt='(2(A12),148(A12))') ' |-----| ', ' |-----| ',&
(' |-----| ', k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Ordem.....', '.....',&
(ordemtroco(k,1), k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Troço.....', '.....',&
(ordemtroco(k,2), k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Nó 1.....', '.....',&
(ordemtroco(k,3), k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Nó 2.....', '.....',&
(ordemtroco(k,4), k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(F12.2))') 'L (m).....', '.....',&
(trcnolno2(k,1), k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(F12.4))') 'S(m/m).....', '.....',&
(trcnolno2(k,2), k=1, ntrococ)
write(1,fmt='(2(A12),148(A12))') ' |----(s)----| ', ' |----(h)----| ',&
(' |---(m3/s)---| ', k=1, ntrococ)
!*****
do j = 1, jmax
write (1,fmt='(f12.0,f12.3,148(f12.6))') j*dt,j*dt/3600.0,&
(qno2(i,j), i=1, ntrococ)
end do
write(1,*)
close(1)
!*****
close(4)
open(unit=4,file='hidrograma_q.txt',&
      form = 'formatted', action='write',&
      access='sequential', position = 'rewind')
!*****
!***Definição do Cabeçalho do Ficheiro [HIDROGRAMA_Q.TXT] ....***
!*****
write(4,fmt=*) 'HIDROGRAMAS de CAUDAIS - (m3/s)'
write(4,fmt='(150(A12))') (' |-----| ', k=1, 150)
write(4,fmt='(A12,149(f12.0))') 'Nó1/Tempo(s).',&
(j*dt, j=1, jmax)
write(4,fmt='(150(A12))') (' |-----| ', k=1, 150)
do i =1, ntrococ
write(4,fmt='(I12,149(f12.6))') ordemtroco(i,3),&
(qno2(i,j), j=1, jmax)
end do
write(4,*)
close(4)
!*****
close(2)
open(unit=2,file='resulta_u.txt',&
      form = 'formatted', action='write',&
      access='sequential', position = 'rewind')
!*****

```

```

!***Definição do Cabeçalho do Ficheiro [RESULTA_U.TXT].....***
!*****
write(2,fmt=*) 'VELOCIDADES DE ESCOAMENTO - (m/s)'
write(2,fmt='(2(A12),148(A12))') ' |-----| ', ' |-----| ', &
(' |-----| ', k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Ordem.....', '.....', &
(ordentroco(k,1), k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Troço.....', '.....', &
(ordentroco(k,2), k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Nó 1.....', '.....', &
(ordentroco(k,3), k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Nó 2.....', '.....', &
(ordentroco(k,4), k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(F12.2))') 'L (m).....', '.....', &
(trcnolno2(k,1), k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(F12.4))') 'S(m/m).....', '.....', &
(trcnolno2(k,2), k=1, ntrococ)
write(2,fmt='(2(A12),148(A12))') ' |----(s)----| ', ' |----(h)----| ', &
(' |---(m/s)---| ', k=1, ntrococ)
!*****
do j = 1, jmax
write (2,fmt='(f12.0,f12.3,148(f12.6))') j*dt,j*dt/3600.0,&
(u(i,j), i=1, ntrococ)
end do
write(2,*)
close(2)
!*****
close(5)
open(unit=5,file='hidrograma_u.txt',&
form = 'formatted', action='write',&
access='sequential', position = 'rewind')
!*****
!***Definição do Cabeçalho do Ficheiro [HIDROGRAMA_U.TXT]...***
!*****
write(5,fmt=*) 'HIDROGRAMAS DE VELOCIDADES - (m/s)'
write(5,fmt='(150(A12))') (' |-----| ', k=1, 150)
write(5,fmt='(A12,149(f12.0))') 'Nó1/Tempo(s). ', &
(j*dt, j=1, jmax)
write(5,fmt='(150(A12))') (' |-----| ', k=1, 150)
do i =1, ntrococ
write(5,fmt='(I12,149(f12.6))') ordentroco(i,3), &
(u(i,j), j=1, jmax)
end do
write(5,*)
close(5)
!*****
close(3)
open(unit=3,file='resulta_h.txt',&
form = 'formatted', action='write',&
access='sequential', position = 'rewind')
!*****
!***Definição do Cabeçalho do Ficheiro [RESULTA_H.TXT].....***
!*****
write(3,fmt=*) 'ALTURAS DE ESCOAMENTO - (mm)'
write(3,fmt='(2(A12),148(A12))') ' |-----| ', ' |-----| ', &
(' |-----| ', k=1, ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Ordem.....', '.....', &
(ordentroco(k,1), k=1, ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Troço.....', '.....', &
(ordentroco(k,2), k=1, ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(I12))') 'Nó 1.....', '.....', &

```



```
(ordentroco(k,3),k=1,ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(I12))')    'Nó 2.....',', .....',&
(ordentroco(k,4),k=1,ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(F12.2))')   'L (m).....',', .....',&
(trcno1no2(k,1),k=1,ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(F12.4))')   'S(m/m).....',', .....',&
(trcno1no2(k,2),k=1,ntrococ)
write(3,fmt='(2(A12),148(A12))')     '|-----(s)----|','|-----(h)----|',&
(' |-----(mm)---| ',k=1,ntrococ)
!*****
do j = 1,jmax
write (3,fmt='(f12.0,f12.3,148(f12.3))') j*dt,j*dt/3600.0,&
(h(i,j)*1000.0,i=1,ntrococ)
end do
write(3,*)
close(3)
!*****
close(6)
open(unit=6,file='hidrograma_h.txt',&
form = 'formatted', action='write',&
access='sequential', position ='rewind')
!*****
!***Definição do Cabeçalho do Ficheiro [HIDROGRAMA_H.TXT]...***
!*****
write(6,fmt=*) 'HIDROGRAMAS DE ALTURAS DE ÁGUA - (mm)'
write(6,fmt='(150(A12))') (' |-----| ',k=1,150)
write(6,fmt='(A12,149(f12.0))') 'Nó1/Tempo(s).',&
(j*dt,j=1,jmax)
write(6,fmt='(150(A12))') (' |-----| ',k=1,150)
do i =1,ntrococ
write(6,fmt='(I12,149(f12.6))') ordentroco(i,3)&
(h(i,j),j=1,jmax)
end do
write(6,*)
close(6)
deallocate(h,u)
deallocate(qno1,qno2,chuvaeno1)
return
end subroutine sub_hidrocinematica
end module mod_hidrocinematica
```

J.18.2 caudal.f90

O ficheiro `caudal.f90` corresponde ao módulo `mod_caudal` que contem a subrotina `sub_caudal()`.

A rotina `sub_caudal()` resolve o esquema linear e não linear proposto por Chow [15] e apresentado no apêndice (G) (pag. 133).

```
*****
!UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.....***
!Faculdade de Ciências e Tecnologia.....***
!*****
!Mestrado em Engenharia Sanitária.....***
!*****
!Por : Davide Santos.....***
!*****
!Módulo : mod_caudal.....***
!Subrotina : sub_caudal - implementação do modelo de onda....***
!                               cinemática.....***
!Nota : Determinação do hidrograma de cheia obedecendo.....***
!ao modelo de onda cinemática. Resolução por método iterativo***
```

```

!proposto por Chow (1988).....***
!*****
! Definição de variáveis :.....***
! alfa - constante.....***
! beta - constante.....***
! c - contante.....***
! dt - intervalo de tempo, s.....***
! erro - variável erro do método de Newton.....***
! erro1 - variável erro do método de Newton.....***
! fk - função.....***
! flk - derivada da função.....***
! i - numeração de troço.....***
! j - numeração dos intervalos de tempo.....***
! ltroco - troço entre duas células , m.....***
! q1 - variável auxiliar.....***
! q2 - variável auxiliar.....***
! q3 - variável auxiliar.....***
! q4 - variável auxiliar.....***
! q5 - variável auxiliar.....***
! qi1j - caudal - q(i+1,j), m3/s.....***
! qi1j1 - caudal - q(i+1,j+1), m3/s.....***
! qij1 - caudal - q(i,j+1), m3/s.....***
! qli1j - caudal unitário de percurso - ql(i+1,j), m**2/s....***
! qli1j1 - caudal unitário de percurso - ql(i+1,j+1), m**2/s.***
!*****
module mod_caudal
!***Módulo de carregamento de dados dos ficheiros.....***
use mod_ficheiros
implicit none
contains
subroutine sub_caudal(alfa,qi1j,qij1,qi1j1,qli1j,qli1j1,ltroco)
!***Definição de variáveis privadas.....***
double precision :: beta, erro, erro1
double precision :: alfa, c, fk, flk
double precision :: q1, q2, q3, q4, q5
double precision :: qi1j, qi1j1, qij1
double precision :: qli1j, qli1j1,ltroco
integer :: i,j
!*****
!***Constantes.....***
!*****
beta = 0.6
erro = 1.0e-6
erro1 = 1.0
!*****
!***Equação do escoamento.....***
!***Implementação do Esquema de Onda Cinemática não Linear...***
!*****
c = dt*qij1/ltroco + alfa*qi1j** (beta) + dt*(qli1j1 + qli1j)/2.0
!*****
!***Primeira iteração obtida pelo esquema linear.....***
!*****
q1 = dt*qij1/ltroco
q2 = alfa*beta*qi1j*((qi1j + qij1)/2.0)**(beta-1.0)
q3 = dt*(qli1j1 + qli1j)/2.0
q4 = dt/ltroco
q5 = alfa*beta*((qi1j + qij1)/2.0)**(beta-1.0)
qi1j1 = (q1+q2+q3)/(q4+q5) !-->(m3/s)
!*****
!***Método de Newton.....***
!*****

```

```
do while (erro1 >= erro)
fk      = dt*qilj1/ltroco + alfa*qilj1**beta - c !--> função f(k)
flk     = dt/ltroco + alfa*beta*qilj1**(beta-1.0) !--> derivada de f(k)
qilj1 = qilj1-fk/flk !-->(m3/s)
!***Verificar (qilj1<0.0). Para valores inferiores a zero....***
!o método instabiliza.....***
if(qilj1<0.0) then
qilj1 = 1.0e-20
erro1 = 1.0e-6
end if
!***Verificação do erro (erro < 1.0e-6).....***
erro1 = abs(fk)
end do
end subroutine sub_caudal
end module mod_caudal
```

Índice

- águas doces superficiais, 17
- óleos, 8, 25

- abstracção inicial, 63
- aditivos químicos, 6
- adubos orgânicos, 19
- adubos químicos, 19
- aerossóis, 11
- agricultura intensiva, 5
- albufeiras, 19
- aniões, 36
- areia, 65, 70
- argila, 65, 70
- As, 16
- aumento da população, 5

- bacia hidrográfica, 28, 70
- biocidas, 16
- bovino, 12

- C, 20
- calibração, 83
- canais pouco profundos, 23
- capacidade de campo, 62
- carência de oxigénio, 8, 12
- carbono orgânico, 10
- catiões, 36
- CBO, 8, 12, 16, 24
- Cd, 9, 20, 24
- cianetos, 16
- Cl, 10
- classificação do solo, 65
- cloragem, 14
- coagulação-floculação, 25
- coberto vegetal, 70
- cobertura do solo, 62
- coeficiente de adsorção, 37
- coeficiente de difusão molecular, 43
- coeficiente de dispersão, 43
- coeficiente de distribuição, 37
- coeficiente de enriquecimento, 40, 42, 43
- coeficiente de retardamento, 36
- colectores unitários, 20
- compostos organoestânicos, 16
- compostos organofosforados, 16
- compostos organohalogenados, 16
- condicionadores de solo, 6
- condutividade hidráulica, 64
- construção, 5
- controlo da erosão, 22
- controlo de descargas ilícitas, 22
- controlo de emissão, 21
- controlo directo, 20
- controlo indirecto, 20
- controlo na aplicação de fertilizantes, 22
- controlo na aplicação de pesticidas, 22
- controlo na fonte, 21
- CQO, 8, 12, 16, 24
- CREAMS, 40
- Criptosporidiose, 13
- Cryptosporidium, 13, 14
- Cu, 9, 10
- Cysts, 13

- dados bibliográficos, 73
- dados de campo, 73
- decantador, 8
- decreto-lei 152/97, 20
- decreto-lei 2/88, 19
- decreto-lei 235/97, 17
- decreto-lei 236/98, 20
- deposição de poeiras, 7
- deposição de poluentes, 46
- desarenação, 24
- desarenadores, 24
- descargas ilegais, 11
- descarregadores de tempestade, 23
- desengorduradores, 24
- desflorestação, 5
- desvio padrão, 71, 72
- dioxinas, 10
- directiva quadro, 15, 16
- drenagem, 62

- empocamento, 62
- emurchecimento, 62
- erosão, 27, 29
- erosão eólica, 11
- erosão hídrica, 11
- erosão por ravina, 11
- erosão por sulcos, 11
- erosão superficial ou laminar, 11
- escoamento potencial, 61
- estações de bombagem, 25
- estrume animal, 18
- estrutura do solo, 70
- eutrofização, 16
- evaporação, 28
- evapotranspiração, 28
- excesso hídrico, 32
- expansão urbanística, 5

- factor de sucção do solo, 64
- factor de técnica cultural, 12

- factor fisiográfico, 12
- Fe, 9
- fenóis, 10
- fertilizantes, 6, 18
- filtro de areia, 25
- fosfatos, 16
- frente de saturação, 38
- função densidade, 71, 72
- função distribuição, 71
- furanos, 10

- Giardia, 13, 14
- Giardiose, 13
- gorduras, 8
- gradagem, 25
- granulometria da chuva, 15

- Hg, 20
- hidrocarbonetos, 25
- hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, 10
- hidrocarbonetos persistentes, 16
- hidrograma, 31
- hidrograma unitário, 27

- IMR, 30
- infiltração potencial, 61
- infiltração real, 61
- intensidade de precipitação, 27
- intensidade de tráfego, 7

- lagos de decantação, 23
- lagos de infiltração, 24
- lagos de laminação, 23
- lagos de retenção, 21, 23
- lagunagem, 23
- legislação, 15
- lei Gausseana, 71
- lei lognormal, 70, 71
- lei normal, 71
- limo, 65, 70
- limpeza de ruas, 7, 22

- média, 71, 72
- método de Monte Carlo, 69
- matéria em suspensão, 16
- matéria orgânica, 70
- mecânica dos fluídos, 29
- mediana, 71, 72
- medidas preventivas, 22
- meia vida, 49
- metais, 9, 16
- metais pesados, 10, 25
- microbiologia, 10, 13
- mineração, 5
- moda, 71, 72
- modelação, 27
- modelação da bacia hidrográfica, 57
- modelação do escoamento, 57
- modelação do transporte de poluentes, 31
- modelo exponencial, 43
- modelo físico, 43
- modelos, 29
- modelos conceptuais, 29
- modelos determinísticos, 29
- modelos empíricos, 29
- modificação hidrológica, 21

- N, 20
- número de escoamento (CN), 62
- número de ordem, 60
- nível de pleno armazenamento (NPA), 19
- naftalinas policlorinadas, 10
- NO₃, 9, 12, 16
- nutrientes, 9, 12

- ocupação do solo, 5
- Oocysts, 13, 14
- origem agrícola, 11
- origem atmosférica, 6
- origem urbana, 6
- oxigénio, 16

- P, 9, 20
- pavimentação porosa, 21
- pavimentos permeáveis, 23
- Pb, 9, 10, 20, 24, 70
- pecuária, 6, 12, 19
- permeabilidade, 66, 70
- permeabilidade específica do solo, 43
- pesticidas, 6, 10, 13, 20
- pH, 14
- plantação em faixas, 11
- plantação segundo as curvas de nível, 11
- plantas, 62
- poços de infiltração, 23
- polinucleares, 10
- poluentes, 27
- poluição, 6
- poluição agrícola, 6
- poluição atmosférica, 6
- poluição difusa, 4
- poluição urbana, 6
- polutogramas, 31
- porosidade, 38
- pousio, 11
- precipitação, 1, 14
- precipitação efectiva, 60, 61
- produção de sedimentos, 55
- produtos fitofarmacêuticos, 16
- programas de informação pública, 22
- PT, 70

- razão de bifurcação da rede de drenagem, 56
- resíduos urbanos, 6
- Ribeira da Meia Légua, 86
- Roehl, 55
- rotatividade de culturas, 11

- sólidos flutuantes, 10
- sólidos suspensos, 7, 11
- sentido do escoamento, 57
- sifões, 25
- silte, 65
- sistemas de controlo de emissão, 23

sistemas de gestão de resíduos, 22
sistemas de modificação hidrológica, 23
sistemas de tratamento, 23
sistemas separativos, 24
sistemas unitários, 24
Soil Conservation Service (SCS), 61
solo, 62
sorpitividade, 64
SS, 24, 25
SST, 7, 24, 70
SSV, 7, 24
substâncias bioacumuláveis, 16
substâncias persistentes, 16
substâncias tóxicas, 10
suíno, 12
sumidouro com cestos, 22
sumidouro com decantação, 22

tamização, 25
tanques de armazenamento, 21
tanques de sedimentação, 21
taxa de infiltração, 43
teor em água no solo, 38, 62
terraços, 12
TKN, 70
topografia, 58
transporte de poluentes, 29
tratamento físico-químico, 25
trincheiras de infiltração, 23
trincheiras drenantes, 23

U.S.NURP, 70
urbanização, 5
USDA, 40
USLE, 27, 55, 70, 73

válvulas, 25

WEPP, 40

Zn, 9, 10, 24, 70