

# MODELAÇÃO DA EROSÃO DO SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO LEÇA, COM A EQUAÇÃO RUSLE E SIG

## MODELLING OF SOIL EROSION IN THE LEÇA RIVER BASIN WITH THE RUSLE AND SIG EQUATION

### S. Petan

Faculdade de Engenharia Civil e Geodésica, Universidade de Ljubljana, Eslovénia // spetan@fgg.uni-lj.si

### F. Taveira-Pinto

IHRH, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal // fpinto@fe.up.pt

### M. Miko

Faculdade de Engenharia Civil e Geodésica, Universidade de Ljubljana, Eslovénia // spetan@fgg.uni-lj.si

### J. Pais-Barbosa

CICGE, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal // jpbarbosa@fc.up.pt

**RESUMO:** A metodologia RUSLE foi utilizada para a previsão da perda do solo e na identificação de áreas com elevado potencial erosivo na bacia do rio Leça, localizada no norte de Portugal. A produção de sedimentos da bacia é de um interesse particular visto que a bacia portuária do Porto de Leixões, situada na foz do rio Leça, actua como uma bacia de decantação, sendo por isso efectuadas, periodicamente, dragagens. O modelo apresentado baseado num Sistema de Informação Geográfica envolve dados de precipitação diária, de topografia, de tipo de solo, de ocupação de solo, nomeadamente os dados do Corine Land Cover 1990 – CLC90 (resolução grosseira) e a Carta de Ocupação de Solo 1990 – COS'90 (resolução mais refinada). O modelo malha (raster) foi estruturado em ArcGIS® para duas escalas diferentes, correspondentes a células com 10 m e 30 m de tamanho, respectivamente. A média anual da perda do solo na bacia do Leça foi estimada em 33,2 t/ha, traduzindo-se numa produção de 52 000 m<sup>3</sup> de sedimentos, considerando uma razão de entrega de sedimentos de 0,217. Relativamente ao risco de erosão do solo, 31% da bacia hidrográfica pode ser classificada como área de risco moderado com uma perda anual entre 12 e 50 t/ha, 18% como áreas de risco de erosão grave e 51% como áreas de risco de erosão baixo.

**Palavras-chave:** bacia do rio Leça, erosão do solo, metodologia RUSLE, SIG, áreas de risco.

**ABSTRACT:** RUSLE methodology was used for soil loss prediction and identification of areas with high potential erosion in the Leça river basin located in the Northern of Portugal. The sediment yield from the basin is of a special interest since the harbour basin of Porto de Leixões, lying at the mouth of the Leça River, acts as a settling basin and has been periodically subjected to dredging. The GIS-based model involves daily rainfall data, topographic data, soil type data, coarse scale Corine Land Cover 1990 - CLC90 and finer scale Land Use Map - COS'90 data. The raster layered model was structured in ArcGIS for two different scales: with a grid cell size of 10 and 30 metres, respectively. The average annual soil loss in the Leça river basin was estimated at 33,2 t/ha, which produces a sediment yield of 52 000 m<sup>3</sup> considering 0,217 as the sediment delivery ratio. 31% of the basin can be classified as areas of moderate erosion risk with annual soil loss between 12 and 50 t/ha, 18% as areas of severe erosion risk, and 51% as areas of low erosion risk.

**Keywords:** Leça river basin, soil erosion, RUSLE methodology, GIS, risk areas.

## 1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo é uma das maiores ameaças relacionadas com a perda de solo fértil para a produção de alimentos e com a poluição dos ecossistemas aquáticos. No entanto, este fenómeno é vital para o equilíbrio sedimentar na região costeira, que, no caso de Portugal, se tem alterado ao longo do tempo, traduzindo-se actualmente por um processo erosivo intenso em particular na região centro (Espinho-Mira).

As taxas de erosão do solo são muito sensíveis ao clima e ao uso da terra (Licciardello *et al.*, 2009), esperando-se um aumento da erosão com as alterações climáticas (Nearing *et al.*, 2004). Até ao momento, medições da erosão dos solos e produção de sedimentos são relativamente escassas e limitadas para regiões de reduzida dimensão. Assim, a avaliação efectiva dos processos de erosão do solo é de uma grande importância para a gestão e prevenção de futuros problemas ambientais associados. Nas últimas décadas, foram desenvolvidos vários modelos para a melhoria dos conhecimentos sobre os processos de erosão do solo. Estes modelos são utilizados para a previsão da perda do solo e a produção de sedimentos em áreas de reduzida dimensão. De acordo com Bhattarai e Dutta, 2008, os modelos actualmente disponíveis, dividem-se em dois grupos: empíricos e orientados para os processos.

O primeiro grupo baseia-se em medições em bacias hidrográficas ou terrenos de pequena área e na sua extrapolação para grandes áreas (Kinnell, 2008), como RUSLE2 (Foster, 2005), WATEM (van Oost *et al.*, 2000), AnnAGNPS (Bingner, 2001) ou AGNPS-UM (Kinnell, 2005). Esses modelos têm uma origem comum: todos incluem uma versão adaptada da equação empírica (R) USLE (Wischmeier e Smith, 1978, Renard *et al.*, 1997). Estes modelos são amplamente aceites pela sua simplicidade e disponibilidade relativa de parâmetros. Contudo apresentam duas grandes desvantagens quando usados em bacias hidrográficas de grande área: a impossibilidade de prever a deposição de solo e a produção de sedimentos (Renard *et al.*, 1997), e a dificuldade de cálculo de parâmetros topográficos (Hickey, 2000).

O segundo grupo é composto por modelos baseados em princípios físicos. EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998),

EROSÃO-3D (Schmidt, 1999), LISEM (De Roo *et al.*, 1996), WEPP (Flanagan e Nearing, 1995) e SWAT (Neitsch *et al.*, 2005) estão entre os modelos de processos que estão em contínuo desenvolvimento. Estes modelos são geralmente exigentes em termos de dados e de computação, o que limita a sua ampla aplicabilidade em prática de gestão, sendo no entanto ferramentas com um elevado potencial, particularmente com a evolução do conhecimento de ensaios em laboratório (Kirkby, 1998).

O modelo apresentado neste trabalho, baseado na utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tem a vantagem da simplicidade do modelo RUSLE e da disponibilidade de parâmetros para a modelação da erosão do solo em SIG. Esta metodologia foi utilizada para estimar a perda de solo e a identificação de áreas com elevado potencial de erosão na bacia do rio Leça, localizado a norte de Portugal.

Esta bacia hidrográfica apenas tinha sido submetida a um estudo específico de erosão do solo em 1999, no Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Leça. Salienta-se o facto de o presente estudo se centrar apenas na área da bacia hidrográfica, ao contrário do PBH do Rio Leça que incluía na sua análise áreas adjacentes litorais com de cerca de 50 km<sup>2</sup>.

A bacia hidrográfica do rio Leça apresenta uma área de 187 km<sup>2</sup> (Figura 1). A precipitação média para os anos hidrológicos entre 1950/51 e 1985/86 é de 1311 mm/ano (Velhas, 1991). A precipitação distribui-se de forma não homogénea, com cerca de 1200 mm/ano a oeste, nas regiões costeiras da bacia, e cerca de 1600 mm na parte leste, região de maior altitude. A maioria da precipitação ocorre durante os meses de inverno, entre Novembro e Março.

Na foz do rio Leça está localizada a bacia portuária do Porto de Leixões, uma estrutura estratégica em termos económicos e de desenvolvimento para esta região. Por razões de segurança e de operacionalidade, esta entidade, realiza frequentemente obras de dragagem para manter as profundidades navegação. Por isso, a quantificação do volume sedimentar que atinge a foz do rio Leça é uma questão-chave relevante na gestão sedimentar da bacia portuária do Porto de Leixões.

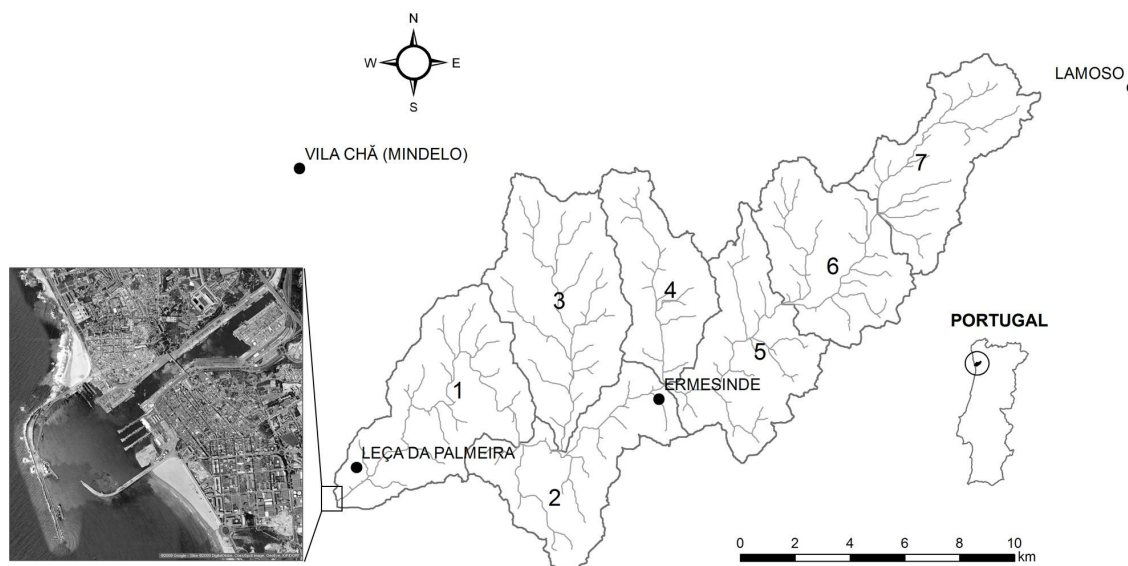


Figura 1 – Localização da área de estudo – bacia hidrográfica do rio Leça.

## 2. MÉTODOS

A Equação Universal de Perda de Solo - USLE (Wischmeier e Smith, 1978) e a versão revista - RUSLE (Renard *et al.*, 1997) foram concebidas para prever ao longo de um período de tempo a perda anual média de solo (A). Ambos os modelos são representados pela equação envolvendo seis factores de erosão,

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

em que R representa o factor de erosividade associado à precipitação média ( $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ ), K o factor de erodibilidade do solo ( $\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ), L o factor de comprimento de encosta, S é o factor de declive, C é o factor relativo ao coberto vegetal e P o factor de prática agrícola ou medidas de controlo de erosão. Os quatro factores adimensionais (L, S, C e P) são obtidos pela razão entre as perdas de solo num local específico, e as perdas de solo na unidade USLE (22,1 m de comprimento, com 9% inclinação, sem vegetação, com áreas de cultivo ao longo do declive). De referir que as medições do (R)USLE são também baseadas nesta metodologia. O modelo RUSLE, utilizado neste trabalho, foi estruturado em ArcGIS® 9.2 em malhas com diferentes dimensões da célula, 10 m e 30 m, respectivamente.

### 2.1. Factor de erosividade - R

O factor de erosividade R é definido como a soma da média anual dos produtos da energia cinética E da precipitação (eventos erosivos) pela intensidade máxima para um período de 30 minutos  $I_{30}$ . No presente trabalho, o factor R foi estimado a partir dos dados de precipitação diária disponíveis no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) usando a equação desenvolvida por Loureiro e Coutinho (2001) para a zona do Algarve:

$$EI_{30\text{mês}} = 7,05 \cdot \text{precipitação}_{10} - 88,92 \cdot \text{dias}_{10} \quad (2)$$

em que  $EI_{30\text{mês}}$  representa o factor R mensal,  $\text{precipitação}_{10}$  a soma da precipitação mensal para dias com precipitação  $\geq 10$  mm e  $\text{dias}_{10}$  o número de dias mensal com precipitação  $\geq 10$  mm. O valor médio anual do factor R foi calculado para 4 estações meteorológicas, duas delas localizadas na bacia hidrográfica do rio Leça, a partir da soma das médias mensais para um período de 12 anos, entre 1983 e 1994. Os valores negativos do factor R obtidos para meses com baixa ou nenhuma precipitação, em número reduzido, foram definidos como zero.

## 2.2. Factor de erodibilidade do solo - K e factor de coberto vegetal - C

De acordo com a carta de solos de Portugal (1:1 000 000, classificação F.A.O.) a zona de estudo apenas apresenta um único tipo de solo - Cambissolo húmico. O factor de erodibilidade do solo K, escolhido de acordo com as instruções para o caso Português (USLE), é de 0,032 (Pimenta, 1998).

Relativamente ao factor C, foi calculado igualmente de acordo com as indicações de Pimenta, 1988, a partir da cobertura Corine Land Cover 1990 (CLC90) (1:100 000) e das cartas de ocupação do solo (COS'90) (1:25 000). Os dados CLC90 para Portugal são baseados em imagens de satélite Landsat para o período entre 1985 e 1987, e os dados COS'90 têm como base a fotografia aérea de 1990.

## 2.3. Factor fisiográfico - LS

Utilizando informação vectorial topográfica com uma equidistância de 10 m foram obtidos dois modelos digitais do terreno (MDT) com células de dimensão igual a 10 m e 30 m, respectivamente. Os MDTs foram utilizados para calcular os valores de inclinação, direcção do fluxo, acumulação de fluxo e comprimento do fluxo para cada célula das malhas. Estes parâmetros são necessários para obter os factores fisiográficos.

O factor L foi calculado por 3 métodos. O primeiro método de cálculo foi baseado na equação sugerida por Desmet e Govers (1996), sendo utilizado frequentemente em modelos de cálculo de erosão do solo, com base em modelos SIG (WATEM, van Oost *et al.*, 2000; AGNPS-UM, Kinnell, 2005):

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_{i,j}^m \cdot 22,13^m} \quad (3)$$

em que  $A_{i,j-in}$  representa a área de contribuição do escoamento superficial para a célula com coordenadas (i,j), D o tamanho da célula em metros, x o factor de orientação da célula (normalmente despresada) e m o expoente declive-comprimento. No primeiro método, o expoente m foi calculado a partir de  $\beta$ , razão entre os canais e os entrecanais de erosão, tal como sugerido no manual do utilizador RUSLE (Renard *et al.*, 1997):

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (4)$$

em que  $\beta$  é dado por

$$\beta = \frac{\text{sen}\theta}{0,0896 \cdot [3,0 \cdot (\text{sen}\theta)^{0,8} + 0,56]} \quad (5)$$

e em que  $\theta$  representa o ângulo do declive da célula.

No segundo método, o valor do expoente m foi considerado constante, igual a 0,4, que é consistente com a abordagem de Moore e Burch (1986).

Por último (método 3), o factor L foi obtido usando o procedimento padrão de (R)USLE:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (6)$$

em que  $\lambda$  representa o comprimento da célula, estimado através da soma do comprimento das linhas de água mais longas da rede de drenagem a montante ( $L_d$ ) da área de acumulação de cada célula e metade da dimensão da célula da malha (D/2). Posteriormente, foram também obtidos, para os três métodos descritos, mapas com valores para o factor L. O valor do factor L foi limitado para cada célula pelo valor máximo do comprimento da célula ( $\lambda$ ), tal como sugerido no manual do utilizador RUSLE (1000 pés ou cerca de 300 m).

O factor de declive S foi calculado com base no ângulo da célula de acordo com o procedimento RUSLE (Renard *et al.*, 1997):

$$S = 10,8 \text{sen}\theta + 0,03 \quad \text{para declives} < 9\% \quad (7)$$

$$S = 16,8 \text{sen}\theta - 0,50 \quad \text{para declives} \geq 9\% \quad (8)$$

## 2.4. Factor de prática agrícola ou medidas de controlo de erosão - P

O apoio ou implementação de práticas de gestão do solo, tais como contornos, cultivo em socacos e terraços, reduz o risco de erosão dos solos (Simms, 2003). Para áreas sem o apoio ou implementação destas práticas, ou no de caso de falta de informação, como no caso em estudo, considera-se o factor P igual a 1. Nesse caso, o modelo calcula o potencial real em vez da perda do solo.

## 2.5. Classes de perda potencial anual de solo

Após o cálculo da perda potencial do solo (A), os valores foram classificados em várias categorias, de acordo com o risco de erosão. A classificação utilizada dividiu em seis categorias o risco de erosão (Tabela 1) (Irvem *et al.* (2007), adequado ao mapeamento dos resultados do modelo.

**Tabela 1** - Classes de perda potencial anual de solo, Irvem et al. (2007).

Perda potencial anual de solo (A) (t/ha)	<5	5–12	12–50	50–100	100–200	>200
Classes de perda potencial anual de solo	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Grave	Muito Grave	Extremamente Grave

**2.6. Razão de Entrega Sedimentar (Sediment Delivery ratio - SDR)**

O modelo (R)USLE calcula a perda potencial do solo (A) e não considera a deposição de solo. Para estimar os sedimentos entregues nas linhas de água – produção de sedimentos (Y), o coeficiente de produção de sedimentos (SDR) deve ser tida em conta ( $Y = A \cdot SDR$ ). O coeficiente de produção de sedimentos de uma determinada bacia hidrográfica é condicionado por muitos factores geomorfológicos, hidrológicos, ambientais e associados às bacias hidrográficas (Fu et al., 2005). Alguns modelos, como o AnnAGNPS, o WATEM e o RUSLE2, utilizam o modelo USLE acoplado com modelos de capacidade de transporte sedimentar para estimar a entrega de sedimentos (Kinnell, 2008). No caso em estudo, a SDR foi estimada a partir da área de drenagem  $A_d$  usando três curvas SDR, todas de acordo com a expressão:

$$SDR = a \cdot A_d^{-b} \tag{9}$$

em que a e b representam os coeficientes propostos por diferentes autores, Tabela 2. O valor médio das três curvas SDR (0,217) foi o valor considerado para a bacia do rio Leça.

**Tabela 2** - Curvas de coeficiente de produção de sedimentos (citado in Lim, 2005).

Coefficiente	Vanoni (1975)	Boyce (1975)	USDA (1979)
a	0,473	0,413	0,566
b	0,125	0,3	0,11

**3. RESULTADOS**

**3.1. Factores de erosão R, C, L e S**

A distribuição espacial da erosividade foi obtida utilizando o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighed) (Figura 2). O valor médio do factor

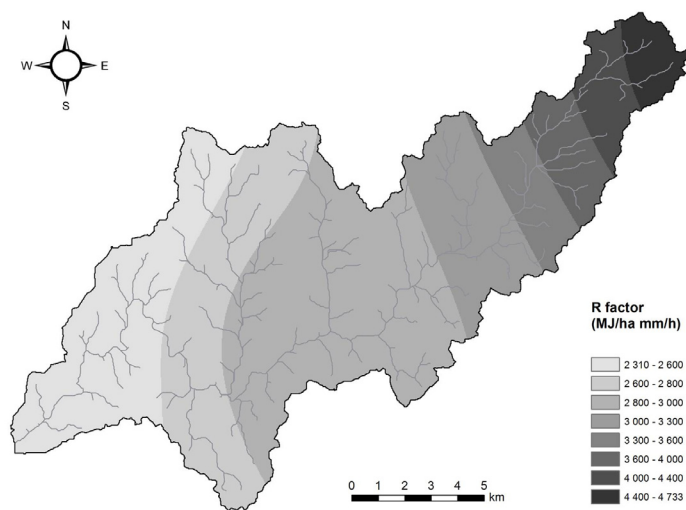
de erosividade (R) para a área da bacia do rio Leça é de 2992 MJ/ha mm/h.

Da análise dos resultados obtidos com base em CLC90 e COS'90 foram identificados, respectivamente, 18 e 91 tipos diferentes para o factor C, com valores a variar de 0 a 0,5 (Figura 3). Diferenças significativas de ocupação do solo foram observadas entre a carta Corine Land Cover e a Carta Ocupação do Solo. De acordo com os dados mais recentes relativos a COS'90, a percentagem de zonas agrícolas diminui 36%, aumentando as áreas florestais e, especialmente, as superfícies artificializadas. Apesar dos valores do factor C serem consideravelmente superiores para as áreas agrícolas quando comparados com as áreas florestais e as áreas artificializadas, o valor médio do factor C decresceu 38%, de 0,19 (CLC90) para 0,12 (COS'90). A distribuição espacial dos factores fisiográficos L e S está ilustrada nas Figuras 4 e 5.

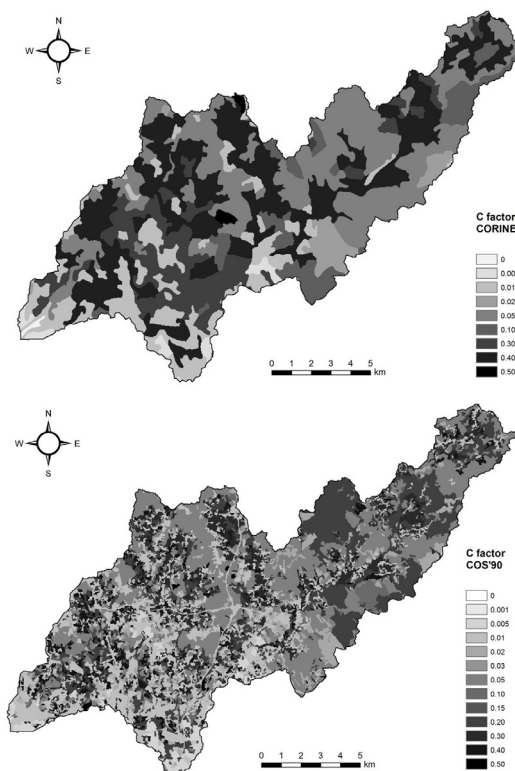
**3.2. Perda de solo (A)**

Foram produzidos seis mapas de perda de solo correspondentes às duas dimensões de células e aos três métodos aplicados para o cálculo do factor L e do factor L limitado. O factor C utilizado foi o estimado a partir dos dados de CLC90. Um breve resumo dos resultados é apresentado na Tabela 3.

A perda média anual de solo (A) e os seus valores máximos foram menos afectados pelo factor L limitado, quando o procedimento padrão do modelo RUSLE, para estimar o factor L, foi implementado (método 3). A limitação do factor L motivou um decréscimo do valor médio de A de 3% e de 8% nos modelos de 10 m e 30 m, respectivamente. Quando aplicado aos dois métodos que utilizaram a equação (3) (método 1 e 2), a redução do valor médio de A aumentou para valores entre 24% e 44%. O efeito de limitação do factor L pode ser observado na Figura 4, onde o L limitado apresenta um impacto mais baixo quando o método 3 foi aplicado. Este método apresentou resultados mais fidedignos e, portanto, os valores do factor L limitado aplicado ao método 3, acompanhado com os factores C estimados com base nos dados da COS'90 foram utilizados para calcular um outro mapa de perda de solo (método 3\_lim \*), exibido na Figura 6.



**Figura 2** - Valor médio do factor de erosividade [R] (malha com células de 30 m) para a bacia do rio Leça para o período entre 1983 e 1994.



**Figura 3** - Factor de cobertura vegetal [C] (malha com células de 30 m) estimado: CLC90 (1:100000) em cima e – COS'90 (1:25000) em baixo.



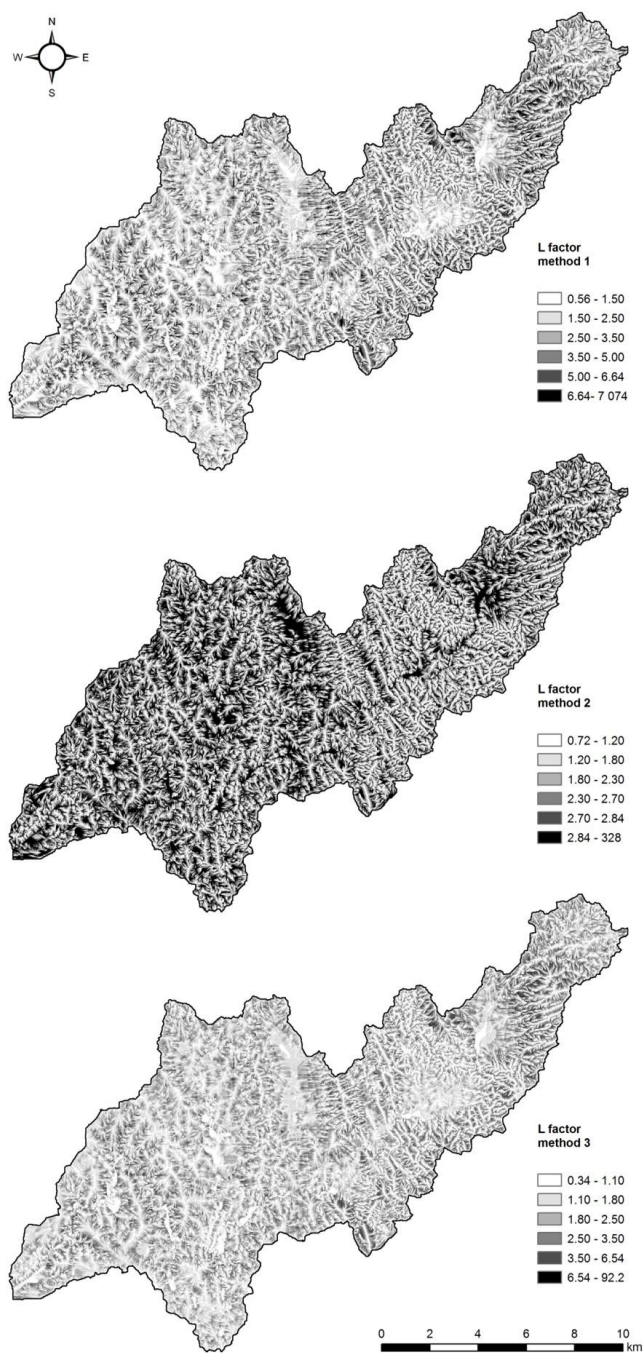
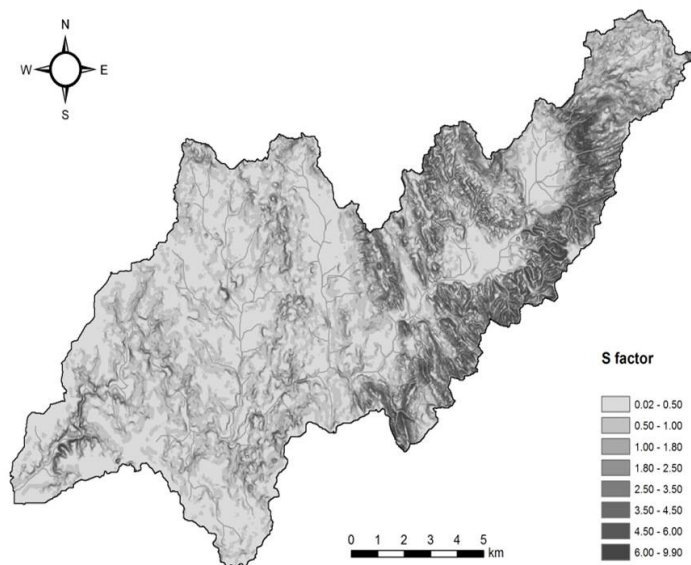


Figura 4 - Comprimento de encosta (L) (malha com células de 10 m), calculado com diferentes métodos: Em cima - método 1 (equações (3), (4) e (5)), intermédio - método 2 (equação (3) e  $m = 0,4$ ), em baixo - método 3 (equações (6), (4) e (5)). A última classe (cor preta) representa as células onde o factor L foi limitado (de acordo com o valor máximo de inclinação comprimento,  $\lambda = 300$ ) para o valor mais baixo da mesma classe de intervalo.

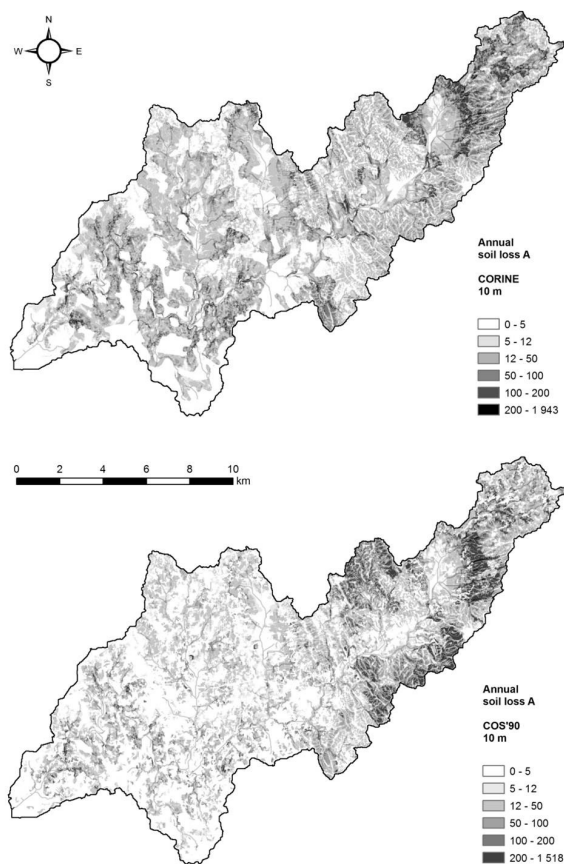


**Figura 5** - Factor de declive S (malha com células de 10 m) para a bacia do Rio Leça.

**Tabela 3** - Perda do solo e classes de perda potencial anual de solo de acordo com os diferentes métodos de cálculo do factor L. Os métodos que utilizam o factor L limitado estão assinalados com “\_lim”. O factor C foi calculado para todos os métodos a partir de CLC90 excepto para o método assinalado por “3\_lim\*”, em que se utilizaram os dados da COS'90.

Método	Dim célula	Perda de solo anual (a) [t/ha]			Área [%] por classe de risco de erosão [t/ha]					
		Média	DP	Valor max.	< 5	5 - 12	12 - 50	50 - 100	100 - 200	> 200
1	10	73,9	938,0	713531	25,1	12,6	32,0	14,9	8,8	6,6
	30	82,6	807,0	202632	24,3	12,1	31,3	15,3	9,4	7,5
1_lim	10	47,9	89,2	2143	26,0	13,3	33,6	15,0	7,7	4,4
	30	46,5	83,2	1510	25,9	13,2	34,1	15,2	7,6	4,1
2	10	50,5	129,0	26165	24,0	12,8	35,2	16,1	7,7	4,2
	30	56,8	145,0	12532	22,6	12,4	34,8	16,4	8,8	5,1
2_lim	10	37,3	55,8	977	25,6	13,2	38,0	15,3	5,7	2,2
	30	36,0	51,7	728	25,0	13,5	38,9	15,1	5,7	1,9
3	10	36,6	72,9	9297	29,0	15,2	35,5	12,2	5,6	2,6
	30	39,8	85,5	7875	28,1	14,8	35,1	12,9	6,0	3,0
3_lim	10	35,4	65,4	1943	29,1	15,3	35,7	12,1	5,4	2,4
	30	36,5	66,9	1440	28,5	15,2	35,6	12,6	5,7	2,5
3_lim*	10	30,1	66,0	1518	42,5	15,4	26,8	7,9	4,5	2,9
	30	30,7	66,7	1180	41,7	15,3	27,3	8,3	4,6	2,8

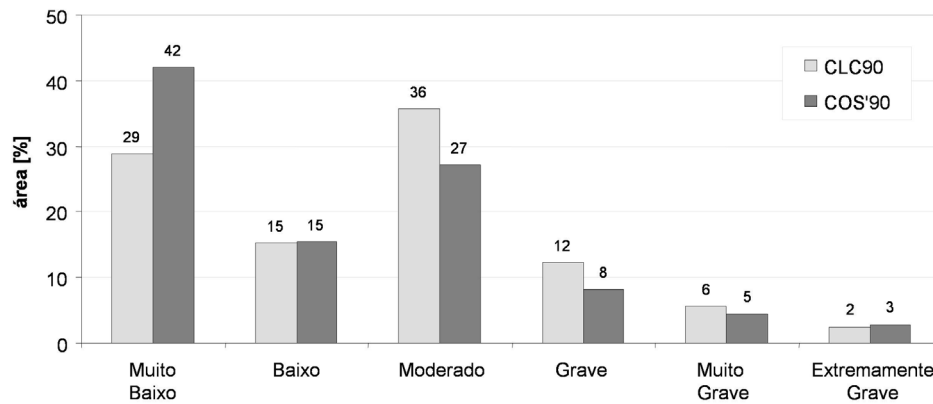




**Figura 6** – Perda de solo anual (A) para o modelo com tamanho de célula de 10 m considerando CLC90 (método 3\_lim) – em cima e COS'90 (método 3\_lim\*) – em baixo.

Os resultados dos últimos três métodos (listados na Tabela 3) mostram que o modelo de malha mais grosseira quando comparado com o modelo de malha refinada apresentam resultados cerca de 9%, 3% e 2% mais elevados que a perda média do solo para o método 3, o método 3\_lim e o método 3\_lim\*, respectivamente. O valores máximos perda média do solo para o modelo de malha mais grosseira foram menores entre 15% a 25% quando comparados com o modelo de malha mais refinada, o que já era esperado devido ao efeito do valor médio do tamanho da célula. Pequenas diferenças são também perceptíveis em relação às classes de perda potencial anual de solo: o modelo de malha grosseira apresenta uma percentagem ligeiramente superior da classe de risco de erosão grave (acima de 50 t/ha de perdas anuais de solo). O modelo que utilizou os dados da COS'90 obteve menores perdas médias anuais do solo quando

comparadas com o modelo que incorpora a cobertura CLC90, em cerca de 15 e 16%, para as malhas de 10 m e 30 m, respectivamente. A menor variação relativa da perda média anual de solo em comparação com a variação do factor C deve-se à diferente distribuição espacial dos valores do factor C em toda a bacia hidrográfica (Figura 3). Analisando o factor C com menor valor médio, proveniente da COS'90, verifica-se que quando agrupadas as classes de perda potencial anual de solo: a soma das três classes "grave" diminuiu, passando de 20% para CLC90 e 15% para COS'90, enquanto a soma das duas classes de perda potencial anual de solo "baixas" aumenta, quando comparadas com as classes "grave" e "moderada", de 44% a 57% para a CLC90 e para a COS'90, respectivamente (Figura 7). Considerando os resultados (dos modelos com dimensões de 10 m e 30 m) apresentados pelos últimos



**Figura 7** - Classificação de perda do solo em função da classe de risco de erosão para os métodos 3\_lim (CLC90) e 3\_lim\* (COS'90).

métodos para CLC90 e COS'90, a perda média anual de solo na bacia do rio Leça é estimada em 33,2 t/ha. Essa taxa de perda de solo conduz à produção de cerca de 135 000 ton/ano de sedimentos, considerando uma taxa de entrega de sedimentos nas linhas de águas de 0,217, calculada com base na média dos valores obtidos pelas três curvas de entrega de sedimentos (equação 9, Tabela 2) e na área total de drenagem da bacia.

#### 4. CONCLUSÕES

A perda potencial média anual de solo (A) para a bacia do rio Leça foi estimada utilizando o modelo (R)USLE com recurso a um SIG, sendo estruturado com base num modelo de malhas com duas dimensões, 10 m e 30 m. O modelo incluiu uma série de 12 anos (1983-1994) de dados de precipitação diária de 4 estações meteorológicas, a partir da qual foi estimado o factor de erosividade (R). A média para o conjunto de factores R obtidos para a área da bacia foi estimada em 2992 MJ/ha mm/h. O factor de declive, S, foi obtido de acordo com o procedimento padrão (R)USLE, enquanto o factor de comprimento de encosta, L, foi calculado pela aplicação de três métodos: o primeiro e o segundo método de acordo com a equação proposta por Desmet e Govers (1996) e o terceiro, como é sugerido no procedimento padrão (R)USLE. O factor de erodibilidade do solo, K, e o factor de cobertura vegetal, C, foram obtidos com base no CLC90 e na COS'90, de acordo com as instruções para o uso do método USLE em Portugal (Pimenta, 1998). Na bacia do rio Leça foi identificado um único tipo de solo - Cambissolo húmico, com um factor de erodibilidade, K,

de 0,032. O factor de práticas agrícolas ou medidas de controlo de erosão, P, foi definido como sendo igual à unidade para toda a bacia. O desempenho dos métodos implementados para estimar o factor L foi também analisado, tendo sido seleccionados os procedimentos padrão da metodologia (R)USLE (método 3\_lim) como os que originaram os resultados mais fidedignos.

As áreas com maior potencial erosivo são identificadas a leste e a nordeste da bacia, onde predominam áreas semi-naturais e florestais, bem como nas margens com grandes declives e regiões de relevo pronunciado na parte inferior do rio, e em secções a oeste. Esta análise poderá estar relacionada com o factor declive (S), crucial para a determinação a erosão potencial. Em média, considerando ambas as fontes de dados sobre a ocupação do solo (CLC90 e COS'90) e a dimensão das malhas (10 m e 30 m), 31% da bacia pode ser classificada como área de risco moderado de erosão (perda de solo anual 12-50 t ha), 18% como grave ou moderada e 51% como baixo ou abaixo do moderado.

A perda média anual de solo na bacia do rio Leça, considerando os resultados mais prováveis, utilizando a ocupação do solo com base em ambas as fontes de dados e a dimensão das malhas, é de 33,2 t/ha. Essa taxa de perda do solo parece ter sido bastante sobrestimada e corresponde às taxas de erosão médias reais mais elevadas na Europa. Considerando a taxa média de entrega de sedimentos de 0,217, é esperada uma produção sedimentar na bacia de aproximadamente 135 000 ton/ano. Comparando os valores obtidos com os apresentados no PBH do Rio Leça, verifica-se que os valores obtidos são significativamente mais elevados. Este facto poderá estar relacionado com os diferentes parâmetros considerados em ambos os

estudos, nomeadamente: a área de drenagem, a carta de solos e o coeficiente de produção de sedimentos. O modelo utilizado, com base num SIG apresenta algumas deficiências. O factor de erosividade da precipitação-escoamento superficial, R, foi estimado com base em dados de precipitação diária disponíveis e numa equação empírica usada para estimar o factor R mensal para o Algarve. A região do Algarve apresenta características climáticas (mediterrânicas) bem diferentes da região em estudo (clima atlântico). Isto poderá ser melhorado com a recolha de dados de intensidade-precipitação para períodos de tempo curtos, de modo a poder estimar o factor R a partir do procedimento padrão (R)USLE, de um modo mais preciso. Recolher dados necessários sobre as práticas de apoio existentes na bacia hidrográfica e incluí-las no modelo contribuiria também para o aperfeiçoamento da estimativa de perdas de solo. A produção de sedimentos foi estimada com base na formulação simples das curvas de entrega de sedimentos que consideram apenas a área de drenagem da bacia. Deste modo a junção de modelos com capacidade de transporte sedimentar permitirá melhorar a estimativa de produção de sedimentos. Finalmente, deverá ser efectuada a verificação dos modelos utilizados, com base em dados obtidos através da monitorização de sedimentos suspensos, o que validaria e melhoraria a exactidão das previsões.

## BIBLIOGRAFIA

- APA (2005) CORINE Land Cover 1990. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- BHATTARAI, R. & DUTTA, D. (2008) A comparative analysis of sediment yield simulation by empirical and process-oriented models in Thailand. *Hydrol. Sci. J.* 53(6), 1253-1269.
- BINGNER, R.L. (2001) AnnAGNPS: Estimating sediment yield by particle size for sheet & rill erosion. In: *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*, March 25-29, 2001, Reno, Nevada. vol. 1, Sediment and flow modeling, 1-7.
- DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., RITSEMA, C.J. (1996) LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrol. Processes* 10, 1107-1117.
- DESMET, P.J.J., GOVERS, G. (1996) A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51, 427-433.
- FLANAGAN, D.C. (ed.), NEARING, M.A. (ed.) (1995) *USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP): Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. NSERL Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory. USDA ARS, West Lafayette, Indiana, USA.
- FOSTER, G.R. (2005) Revised Universal Soil Loss Equation, version 2 (RUSLE2), Science Documentation, draft. USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C., USA.
- FU, B.J., ZHAO, W.W., CHEN, L.D., ZHANG, Q.J., LÜ, Y.H., GULINCK, H., POESEN, J. (2005) Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China. *Land Degrad. Dev.* 16, 73-85.
- HICKEY, R. (2000) Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS. *Cartography* 29, no. 1, 1-8.
- IGP (1990) *Carta de Ocupação do Solo - COS'90*. Instituto Geográfico Português. Available at <http://snig.igeo.pt/COS/>. Accessed 04/12/2008.
- Instituto de Ambiente, 1971. *Carta dos Solos – Atlas do Ambiental Digital Reprodução da Carta de Solos do Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário*, delineada por J. Carvalho Cardoso, M. Teixeira Bessa e M. Branco Marado. Disponível em [http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp?zona=continente&grupo=&tema=c\\_tiposolo](http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp?zona=continente&grupo=&tema=c_tiposolo). Acedido 04/12/2008.
- IRVEM, A., TOPALOGLU, F., UYGUR, V. (2007) Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey. *J. Hydrol.* 336, 30-37.
- KINNELL, P.I.A. (2005) AGNPS-UM: Agricultural Non Point Source Pollution Model using the USLE-M. User guide, version 4.02. University of Canberra, Canberra, Australia.
- KINNELL, P.I.A. (2008) Sediment delivery from hillslopes and the Universal Soil Loss Equation: some perceptions and misconceptions. *Hydrol. Processes* 22, 3168-3175.
- KIRKBY, M.J., ABRAHART, R., MCMAHON, M.D., SAO, J., THORNES, J.B. (1998) MEDALUS soil erosion models for global change. *Geomorphology* 24, 35-49.
- LICCIARDELLO, F., GOVERS, G., CERDAN, O., KIRKBY, M.J., VACCA, A., KWAAD, F.J.P.M. (2009) Evaluation of the PESERA model in two contrasting environments. *Earth Surf. Processes Landf.* 34, 629-640.
- LIM, K. J., SAGONG, M., ENGEL, B.A., TANG, Z., CHOI, J., KIM, K. (2005) GIS-based sediment assessment tool. *Catena* 64, 61-80.
- LOUREIRO, N.S. & COUTINHO, M.A. (2001) A new procedure to estimate RUSLE  $EI_{30}$  index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. *J. Hydrol.* 250, 12-18.

- MOORE, I.D., BURCH, G.J. (1986) Physical basis of the length slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1294-1298.
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., SMITH, R.E., GOVERS, G., POESEN, W.A., AUERSWALD, K., CHISCI, G., TORRI, D., STYCZEN, M.E. (1998) The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surf. Processes Landf.* 23, 527-544.
- NEARING, M.A., PRUSKI, F.F., O'NEAL, M.R. (2004) Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1): 43-50.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. (2005) Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Theoretical Documentation – version 2005. Blackland Research Center, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Temple, TX, USA.
- PBH do Rio Leça (2000) – Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Leça, 1ª Fase: Volume I, II, III, e IV (Síntese, Enquadramento, Análise e Diagnóstico), Disponível em <http://www.arhnorte.pt/?co=247&tp=7&cop=237&LG=0&mop=377&it=pagina>. Acedido 29/01/2010.
- PIMENTA, M.T. (1998) 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, Lisbon, Portugal.
- RENARD, K. G., FOSTER, G. A., WEESIES, G. A., MCCOOL, D. K. & YODER, D. C. (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA Agricul.Handbook 703. Agricultural Research Service, Washington, DC, USA.
- SCHMIDT, J., VON WERNER, M., Michael, A. (1999) Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. *Catena* 37, 449-456.
- SIMMS, A.D., WOODROFFE, C.D., JONES, B.G. (2003) Application of RUSLE for erosion management in a coastal catchment, southern NSW. In: MODSIM 2003: International Congress on Modelling and Simulation, volume 2, Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solutions (Townsville, Queensland, Australia, July 14-17), 678-683.
- VAN OOST, K., GOVERS, G., DESMET, P. (2000) Evaluating the effect of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecol.* 15, 577-589.
- VELHAS, E. (1991) A Bacia Hidrográfica do Rio Leça, Estudo Hidroclimatológico. *Revista de Faculdade de Letras - Geografia, I Série, Vol. VH, Porto, Portugal.*
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricu. Handbook 537. Agricultural Research Service, Washington, DC, USA.