

Modelação da topografia do terreno e simulação da erosão hídrica numa pequena bacia hidrográfica com uso agro-florestal

Topography modelling and simulation of soil erosion by water, in a small agro-forestry basin

António Canatário Duarte^{1,2,3,*}, Carla Ferreira^{4,5} & Giuliano Vitali⁶

¹ Instituto Politécnico de Castelo Branco-Escola Superior Agrária, Castelo Branco, Portugal

² Centro de Estudos GEOBIOTEC-Pólo da UBI, Covilhã, Portugal

³ Centro de Estudos CERNAS-IPCB, Castelo Branco, Portugal

⁴ Departamento de Geografia e Bolin Centro de Investigação para o Clima, Universidade de Estocolmo, Estocolmo, Suécia

⁵ Centro de Recursos Naturais, Ambiente e Sociedade (CERNAS), Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária, Coimbra, Portugal

⁶ School of Agriculture/University of Bologna, Italy

(*E-mail: acduarte@ipcb.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.33350>

Recebido/received: 2023.07.31

Aceite/accepted: 2023.10.16

RESUMO

Na simulação dos impactes das atividades agrícolas na poluição difusa à escala da bacia hidrográfica, é importante uma adequada configuração topográfica do terreno e a compreensão do seu comportamento hidrológico. Neste estudo foi utilizado o módulo FlowNet Generator, componente do modelo AnnAGNPS (Annualized Agriculture Nonpoint Source), para avaliação da influência da resolução vertical do Modelo Digital do Terreno (MDT) na configuração topográfica e hidrológica, e no processo de erosão hídrica do solo, de uma pequena bacia agro-florestal (190 ha) localizada no concelho de Idanha-a-Nova. Foi realizado um levantamento georeferenciado da rede de drenagem superficial da bacia, que foi depois comparada com os resultados das redes simuladas pelo módulo FlowNet Generator para dois MDT com resoluções verticais de 1 m e 5 m. Verificou-se que o MDT com resolução vertical de 5 m não conduziu a resultados satisfatórios, dado que a rede de drenagem natural simulada se afastava significativamente da observada no campo. Por outro lado, a rede de drenagem natural gerada com o MDT de resolução de 1m foi bastante próxima da rede observada. A influência da diferente configuração topográfica da bacia hidrográfica na simulação do processo de erosão hídrica do solo, com o modelo RUSLE, traduziu-se numa diferença significativa considerando os valores de 5.85 e 4.17 ton/ha.ano, respectivamente para o MDT com 1 m e 5 m de resolução vertical.

Palavras-chave: Modelo Digital do Terreno, modelo RUSLE, modelação da topografia do terreno, simulação da erosão hídrica em bacias hidrográficas.

ABSTRACT

To simulate the impacts of agricultural activities on diffuse pollution at the basin scale, it is important to use adequate topographic data and understand its hydrological behavior. In this study, the FlowNet Generator module, component of the AnnAGNPS (Annualized Agriculture Nonpoint Source) model, was used to evaluate the influence of the vertical resolution of the Digital Elevation Model (DEM) on the topographic and hydrological configuration, and on runoff-erosion process, of a small agro-forestry basin (190 ha) located in the municipality of Idanha-a-Nova. A georeferenced survey of the basin's stable surface drainage network was carried out, and the results were compared with output network simulated by FlowNet Generator module for two DEMs with vertical resolutions of 1 m and 5 m. It was observed that the DEMs with a vertical resolution of 5m did not lead to satisfactory results, given that the simulated natural drainage network was significantly different from the one observed in the field. On the other hand, the natural drainage network generated with the 1m resolution DEM was very close to the observed network. The influence of the different topographic configuration of the basin in the simulation of soil erosion by water, using the RUSLE model, resulted in a significant difference considering the values of 5.85 and 4.17 ton/ha.year, respectively for the DEM with 1 m and 5 m vertical resolution.

Keywords: Digital Elevation Model, RUSLE model, topography modelling, soil erosion, agro-forestry basin.

INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação concebidos para a escala territorial da bacia hidrográfica, conjugados com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), simplificam o processo de compatibilização das condições daquela unidade territorial, e apresentam-se como ferramentas indispensáveis para a simulação dos processos distribuídos geograficamente, tal como o processo de erosão hídrica, já que permitem configurar e comparar soluções alternativas de uso e ocupação do solo tendentes ao seu uso sustentável (Duarte *et al.*, 2021). O uso dos modelos hidrológicos contempla normalmente uma primeira fase de configuração topográfica da bacia, tendo por base o Modelo Digital de Terreno (MDT) com uma determinada resolução vertical, que estará relacionada com a área de estudo. Um dos parâmetros frequentemente usado na aferição desta configuração é a rede de drenagem gerada, que deverá ser o mais semelhante possível à observada na área de estudo (Bingner & Theurer, 2001).

O modelo AnnAGNPS (Annualized Agricultural Nonpoint Source) integrado em ambiente SIG (Cronshey & Theurer, 1998), é um dos modelos existentes que simula os processos de poluição difusa em zonas agrícolas, bem como a erosão hídrica do solo, fornecendo resultados diários de escoamento, produção e arrastamento de sedimentos e outros contaminantes (Abdelwahab *et al.*, 2018). Este modelo comporta um módulo (FlowNet Generator) que, com base no DEM, estabelece os limites da bacia hidrográfica e hierarquiza a rede de drenagem. Dos parâmetros gerados, são considerados como mais importantes os limites das sub-bacias, e dentro destas os das células, a rede de drenagem

natural e os factores topográfico (LS) da RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) para cada uma das células (Bingner & Theurer, 2001). A resolução vertical do DEM tem influência na divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias, e, portanto, nos parâmetros que as caracterizam, tendo por consequência interferência na simulação do escoamento gerado e dos sedimentos e outros contaminantes arrastados (Bingner *et al.*, 1997).

Entendendo que uma adequada metodologia para se testar aquela influência é a comparação entre a rede de drenagem natural observada na bacia hidrográfica de estudo, e a que é gerada pelo módulo FlowNet Generator do modelo AnnAGNPS, este trabalho tem como objectivo principal aferir a influência da resolução vertical do DEM na configuração topográfica de uma bacia hidrográfica de pequenas dimensões, e a sua influência na simulação do processo de erosão hídrica do solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da bacia hidrográfica de estudo

A bacia hidrográfica em estudo localiza-se no concelho de Idanha-a-Nova. Apresenta uma forma alongada com orientação norte-sul (Figura 1), e uma área de cerca de 190 ha. O relevo é ondulado, com cotas que variam entre 210 e 248 m (Figura 1c), e declives até 10%, sendo os mais representativos entre 2 e 4%. É drenada por um conjunto de linhas de água tributárias de uma principal de 3ª ordem, que por sua vez é afluente sequencialmente do ribeiro de Vale de Gamo, ribeira do Aravil e rio Tejo (Duarte & Mateos, 2022). É uma área

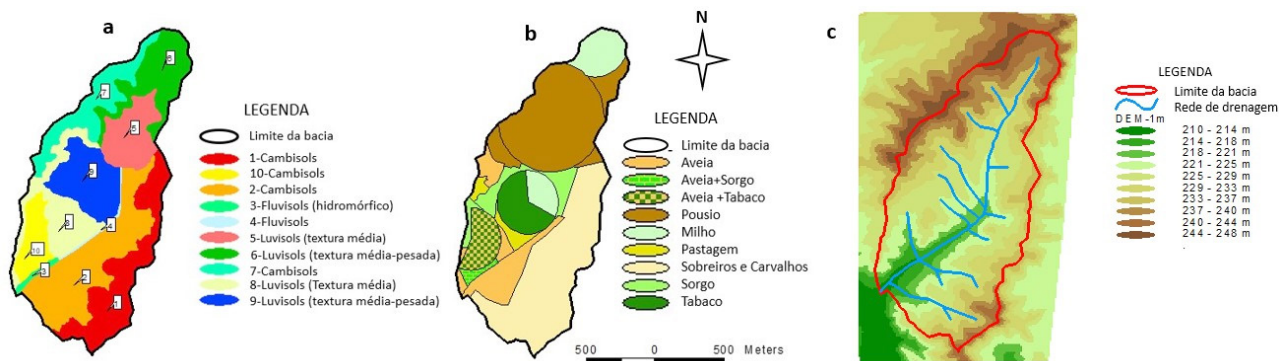


Figura 1 - Categorias de solos presentes na bacia (a), usos agroflorestais no ano do estudo (b), e Modelo Digital do Terreno com limite da bacia e rede de drenagem natural (c).

maioritariamente agrícola incluída no Aproveitamento Hidroagrícola da Campina da Idanha, em que as culturas praticadas são, ao tempo deste estudo, aveia, milho, sorgo, pastagem e tabaco, mas também ocupada por floresta jovem de carvalhos e sobreiros (Figura 1b). Sendo relativamente próximo do rio Tejo, os solos presentes nesta bacia hidrográfica são sobretudo Cambisolos e Luvisolos, sendo em boa parte depósitos de planalto da bacia daquele rio, que em algumas áreas evidenciam alterações mais ou menos acentuadas (Figura 1a).

Os dados para o cálculo dos factores K, C e P do modelo RUSLE para simulação da erosão do solo, foram obtidos pelo reconhecimento e abertura de perfis dos solos presentes na bacia hidrográfica de estudo, e respectivas propriedades, para o cálculo do factor K, pela observação no campo dos usos agro-florestais e práticas culturais tendentes à conservação do solo, respectivamente para cálculo do factor C, e P. O cálculo dos factores referidos anteriormente, foi estabelecido de acordo com as metodologias descritas por Renard *et al.* (1997).

Modelos Digitais do Terreno e rede de drenagem natural

Para o cumprimento dos objectivos definidos neste estudo, foram elaborados dois MDTs com resoluções verticais de 1 m e 5 m com base em informação cartográfica existente. Os dados de base para a elaboração dos DEM's foram as cartas topográficas na escala de 1:2500 (Folhas 6I e 7I), levantadas e desenhadas pela ex-Junta Autónoma das Obras de Hidráulica Agrícola em 1947 para o concelho e freguesia de Idanha-a-Nova, aquando do projecto da obra do Aproveitamento Hidroagrícola da Campina da Idanha. Os MDTs foram obtidos por digitalização das curvas de nível com espaçamento vertical de 1 m e 5 m, com a resolução horizontal (dimensão da quadrícula) assumida por defeito pelo software SIG usado, e georeferenciados com o sistema de coordenadas UTM (Duarte, 2006). Para que fosse elaborado um tema em ambiente SIG das linhas de água existentes na bacia hidrográfica, foi necessário percorrer toda a rede de drenagem até onde esta se podia identificar no terreno, registando-se as coordenadas com o auxílio de um aparelho GPS (Global Position System; GeoExplorer3 da TRIMBLE), à medida que se avançava ao longo das

linhas de água. O equipamento GPS foi usado no campo com a recepção de sinais e triangulação de pelo menos cinco satélites, tendo sido os registos do aparelho corrigidos posteriormente (correção diferencial) com dados captados pela estação fixa da ESA/IPCB (Escola Superior Agrária/Instituto Politécnico de Castelo Branco), com o auxílio de software próprio (GPS Pathfinder Office). Este permitiu também exportar os dados, corrigidos e validados, para o formato *shapefile*, por forma a serem utilizados em ambiente SIG e serem compatibilizados com outros dados gerados no mesmo ambiente.

Módulo FlowNet Generator do modelo AnnAGNPS

O módulo FlowNet Generator, que por sua vez é constituído pelos programas operacionais TopAGNPS (Topographic AGNPS), AgFlow (Agricultural

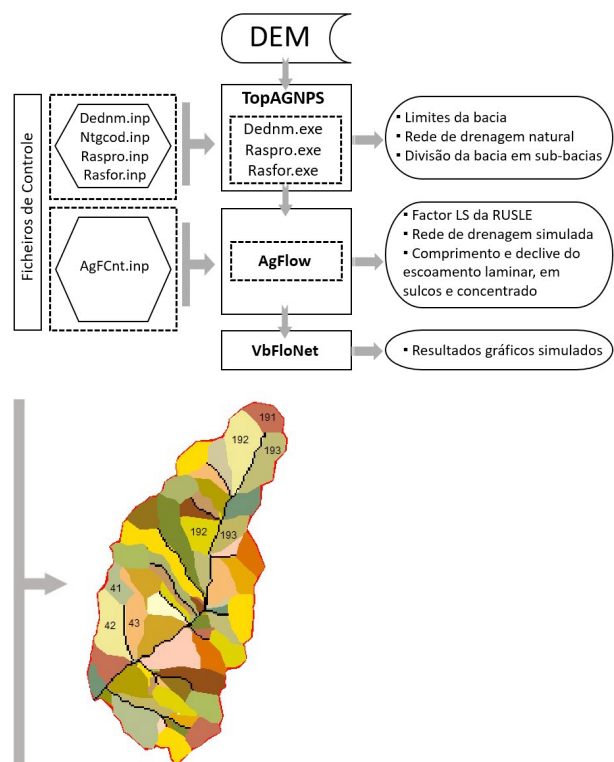


Figura 2 - Sequência da execução dos vários programas do módulo FlowNet Generator, e forma como este módulo divide uma bacia hidrográfica em sub-bacias e células, aplicada à bacia hidrográfica de estudo, tendo por base um MDT com uma resolução vertical de 1m.

watershed **Flownet**) e por um programa que funciona como uma interface gráfica **VbFloNet (Visual basic Flow Network)**. O programa **TopAGNPS** usa a mesma abordagem que o programa **TOPAZ (Topographic Parameterization)**, com algumas modificações para funcionar integrado no modelo **AnnAGNPS** (Garbrecht & Martz, 1995). O primeiro a ser executado, conforme é explicitado na Figura 2, é o programa **TopAGNPS**, que, obtendo do **MDT** as cotas do terreno, permite definir os limites da bacia hidrográfica, obter a rede de drenagem e a divisão em sub-bacias, que por sua vez são divididas em células que coletam o escoamento para uma linha de água. Os subprogramas **Dednm**, **Raspro**, **Rasfor** do programa **TopAGNPS**, e o programa **AgFlow**, comportam ficheiros de controlo, que podem ser alterados pelo utilizador em função do mais adequado à simulação em causa.

O ficheiro **Dednm.inp**, que controla o sub-programa **Dednm.exe**, permite a introdução do par de valores **CSA (Critical Source Area)** e **MSCL (Minimum Source Channel Length)**, que são respectivamente a área e longitude mínimas necessárias para que se forme uma linha de água em que o escoamento é suficientemente concentrado e de modo a permitir a sua identificação no campo. Como facilmente se deduz, o par de valores **CSA/MSCL** determina a hierarquização da rede de drenagem e o nível de divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias. Na sequência de várias simulações com combinações diferentes do par de valores **CSA/MSCL**, e comparação com a rede de drenagem observada na bacia, os valores que conduziu a melhores resultados foi, **CSA igual 3.0 ha** e **MSCL igual a 80.0 m**, para ambos os **MDTs** com resoluções verticais

diferentes (1m e 5m). Os resultados do programa **TopAGNPS** são transferidos para o programa **AgFlow** (Figura 2), sendo reordenados em quadrículas tipo canal (linha de água) e tipo encosta. O programa **AgFlow** calcula adicionalmente o factor **LS** da equação **RUSLE**, e o comprimento e declive para o escoamento laminar (primeiros 50 m da linha de escoamento), em sulcos (50 m seguintes à linha de escoamento) e concentrado (parte restante da linha do escoamento) (Theurer & Cronshey, 1998). O programa **VbFloNet** é uma interface gráfica em linguagem **Visual Basic**, que é executado opcionalmente desde que o modelo **AnnAGNPS** está integrado em ambiente **SIG**.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Configuração topográfica da bacia de estudo

A análise conjunta das Figuras 3a e 3b permite inferir que, relativamente à linha de água de 3ª ordem, não ocorrem diferenças evidentes entre a rede de drenagem observada no campo e simulada para os **MDTs** com resoluções diferentes. Já em relação à restante parte da rede de drenagem constata-se diferenças no **MDT** com resolução vertical de 5 m (Figura 3b), que se traduz por traçados diferentes das linhas de água, bem como pela não consideração de algumas pequenas linhas de água de cabeceira, resultados que foram verificados por outros autores (Bingner *et al.*, 1997). No que concerne à figura que tem por base o **DEM** com resolução vertical de 1m (3a), a rede de drenagem gerada pelo módulo **FlowNet Generator** sobrepõe-se quase na perfeição à rede de linhas de água observadas no

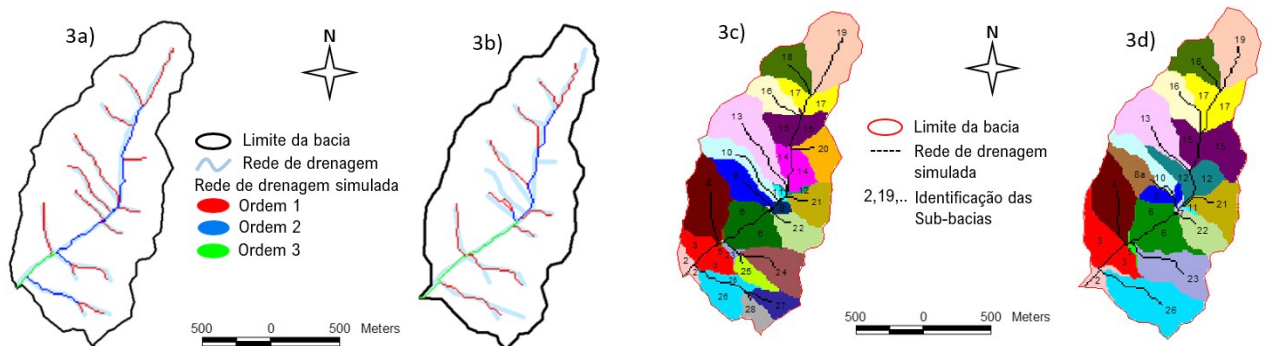


Figura 3 - Linhas de água observadas na bacia e simuladas pelo módulo **FlowNet Generator** - 3a) **MDT** 1 m, 3b) **MDT** 5 m, e simulação da divisão da bacia hidrográfica de estudo em sub-bacias pelo mesmo módulo do modelo **AnnAGNPS** - 3c) **MDT** 1 m, 3d) **MDT** 5 m, para valores de **CSA=3.0 ha** e **MSCL=80.0 m**.

terreno. Outra forma de analisar a diferente configuração da bacia hidrográfica que resulta da utilização de MDTs com resoluções diferentes, é através da observação das Figuras 3c e 3d, referentes à divisão da bacia em sub-bacias, respectivamente MDT 1m e MDT 5m. Esta divisão em sub-bacias bastante diferente sobretudo na zona de jusante da bacia hidrográfica, onde as sub-bacias geradas são de menor dimensão. Esta diferença está relacionada com terem sido ou não geradas algumas pequenas linhas de água de 1ª ordem, o que, em correspondência, implica também um número diferente de sub-bacias.

Simulação da erosão hídrica do solo

A simulação do processo de erosão hídrica do solo foi estabelecida com as aproximações metodológicas do modelo RUSLE (Renard *et al.*, 1997). Na sequência da configuração topográfica da bacia de estudo, e da sua divisão em sub-bacias, e estas em células, os atributos das variáveis da equação RUSLE em cada célula, foi o valor de cada variável mais representativo em cada célula. Pelo facto da área da bacia ser relativamente pequena, considerou-se que o valor do factor erosividade da precipitação seria o mesmo para toda a bacia, e igual a 1279

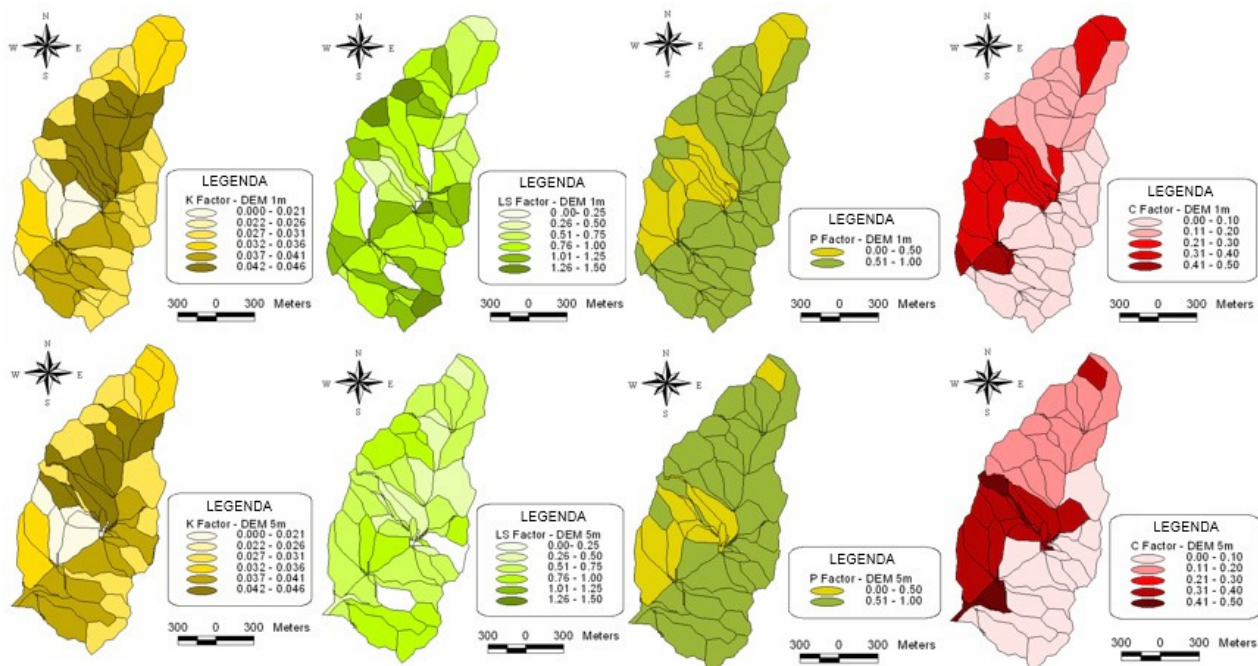


Figura 4 - Distribuição espacial dos factores K, LS, C e P do modelo RUSLE, por sub-bacias geradas pelo módulo FlowNet Generator para os MDTs de resolução vertical de 1m e 5m.

Quadro 1 - Valores médios do declive e comprimento do declive do escoamento laminar, em sulcos e concentrado, para cada célula dos MDTs de 1 m e 5 m de resolução vertical, e média do factor LS

DEM	Escoamento laminar		Escoamento em sulcos		Escoamento concentrado		Factor LS
	Declive (m/m)	Comprimento do declive (m)	Declive (m/m)	Comprimento do declive (m)	Declive (m/m)	Comprimento do declive (m)	
DEM 1 m	0,038	49,4	0,060	45,2	0,038	129,0	0,861
DEM 5 m	0,028	49,4	0,048	48,1	0,030	211,4	0,611

MJ.mm/ha.h.ano. Pela análise da Figura 4, complementada com a informação do Quadro 1, podemos constatar que a variável relativa à topografia (factor LS) é a que apresenta maior diferença na sua distribuição espacial, entre os dois MDTs (Zhanna *et al.*, 2023).

Constata-se ainda que o factor do coberto vegetal assume valores mais elevados nas células em que o uso predominante é a aveia, que se refletirá em valores elevados de perda de solo naquelas células (Figura 5).

Pelos resultados das perdas de solo, com o uso de diferente resolução vertical dos MDTs, e por consequência com diferentes configurações topográficas, é evidente a sua influência na simulação do processo de erosão hídrica do solo, traduzido nos valores de 5.85 e 4.17 ton/ha.ano, respectivamente para o MDT com 1 m e 5 m de resolução vertical. Considerando a média das variáveis do modelo RUSLE de todas as células que resultaram da configuração topográfica dos dois MDTs, que foram para o MDT 1 m, 0.861, 0.034, 0.208 e 0.888, respectivamente para as variáveis LS, K, C e P, e para o MDT 5 m, 0.611, 0.034, 0.214 e 0.868, respectivamente para as mesmas variáveis, é notório que a maior influência na diferença das perdas de solo simuladas baseadas nos dois MDTs, se traduz nos valores do factor LS (Bingner & Theurer, 2001).

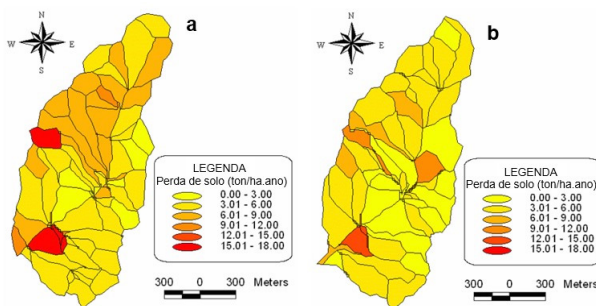


Figura 5 - Distribuição espacial da perda de solo simulada pelo modelo RUSLE, por sub-bacias geradas pelo módulo FlowNet Generator para os MDTs de resolução vertical de 1 m (a) e 5 m (b).

CONCLUSÕES

Da realização deste estudo, e considerando os objetivos definidos, testar a influência da resolução vertical do MDT na configuração topográfica de uma pequena bacia hidrográfica e a sua interferência na simulação da erosão hídrica do solo, é possível apurar algumas conclusões, que se registam a seguir.

Nos estudos em que os aspectos hidrológicos de superfície assumem papel relevante, torna-se importante a existência de informação topográfica detalhada, que deve estar relacionada com a área da unidade territorial de estudo. Assim, ficou demonstrado a interferência significativa que pode ter o uso de um MDT com resolução vertical não adequada à extensão da bacia hidrográfica, na divisão da mesma em sub-bacias e nos parâmetros topográficos e hidrológicos relacionados, e por extensão na simulação dos processos de poluição difusa. A influência da diferente configuração topográfica da bacia de estudo na simulação do processo de erosão hídrica do solo, traduziu-se numa diferença significativa considerando os valores de 5.85 e 4.17 ton/ha.ano, respectivamente para o MDT com 1 m e 5 m de resolução vertical.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito das Unidades de I&D GeoBioCiências, GeoTecnologias e GeoEngenharias - GEOBIOTEC - Projeto UIDB/04035/2020, e Centro de Estudos de Recursos Naturais, Ambiente e Sociedade – CERNAS/IPCB – Projecto UIDB/ Projecto UIDB/00681/2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelwahab, O.M.; Ricci, G.F.; De Girolamo, A.M. & Gentile, F. (2018) - Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: Comparison between SWAT and AnnAGNPS models. *Environmental Research*, vol. 166, p. 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.029>
- Bingner, R.L. & Theurer, F.D. (2001) - Topographic Factors for RUSLE in the continuous-Simulation, Watershed Model for Predicting Agricultural, Non-Point Source Pollutants (AnnAGNPS). In: *Proceedings of the Soil Erosion Research for the 21st Century*. Honolulu, HI, USA.
- Bingner, R.L.; Garbrecht, J.; Arnold, J.G. & Srinivasan, R. (1997) - Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. *Transactions of the ASAE*, vol. 40, n. 5, p. 1329-1335.
- Cronshey, R.G. & Theurer F.G. (1998) - AnnAGNPS - Non-Point Pollutant Loading Model. In: *Proceedings First Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*. Las Vegas, NV, USA.
- Duarte, A.C. & Mateos, L. (2022) - How changes in cropping intensity affect water usage in an irrigated Mediterranean catchment. *Agricultural Water Management*, vol. 260, art. 107274. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107274>
- Duarte, A.C.; Ferreira, C. & Vitali, G. (2021) - Use of simulation models to aid soil and water conservation actions for sustainable agro-forested systems. In: Jhariya, M.K.; Meena, R.S.; Banerjee, A.; Meena, S.N. (Eds.) - *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, p. 389-412. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00006-5>
- Duarte, A.C. (2006) - *Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica*. Tesis Doctoral. Córdoba, Universidad de Córdoba.
- Garbrecht, J. & Martz, W. (1995) - Advances in automated landscape analysis. In: Espey, W.H. & Combs, P.G. (Eds.) - *Proceedings of the First International Conference on Water resources Engineering*, American Society of Engineers. San Antonio, Texas, USA, vol. 1, p. 844-848.
- Renard, K.G.; Foster, G.R.; 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-ARS, Ag. Handbook 703, 404 p.
- Theurer, F.D. & Cronshey, R.G. (1998) - AnnAGNPS – Reach routing processes. In: *Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*. Las Vegas, Nevada, USA, p. 1-25 to 1-32.
- Zhanna, A.; Buryak, P.A.; Ukrainsky, A.V.; Gusarov, S.V. & Lukin, A.B. (2023) - Geomorphic factors influencing the spatial distribution of eroded Chernozems in automated digital soil erosion mapping. *Geomorphology*, vol. 439, art. 108863. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108863>