

## Elevada resolução de Modelos Digitais de Elevação - modelação do fluxo interno e instabilidade de taludes em terraços agrícolas

### Digital Elevation Models high resolution - Internal flow modelling and riser instability of agricultural terraces

C. Bateira<sup>1\*</sup>, A. Costa<sup>2</sup>, M. Mendonça<sup>2</sup>, J. Fernandes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Riskam-CEG-IGOT-UL/FLUP-UP.

<sup>2</sup>Universidade do Porto, Departamento de Geografia.

\*carlosbateira@gmail.com.

**Palavras-chave:** Terraços, Instabilidade de Taludes, Modelação Hidrológica, DEMs de Resolução Elevada, SHALSTAB.

**Key-words:** Terraces, Riser Instability, Hydrologic Modelling, High Resolution DEMs, SHALSTAB.

### INTRODUÇÃO

Em áreas de forte presença da atividade agrícola torna-se difícil a elaboração de inventários que suportem a análise estatística da instabilidade dos taludes dos terraços agrícolas. Nesse sentido tem vindo a ser testado o desempenho dos modelos matemáticos de base física que permitem a modelação autónoma relativamente aos inventários que, quando apresentam limitações decorrentes da atividade agrícola, se tornam pouco fiáveis para a modelação da suscetibilidade a deslizamentos peliculares translacionais. A utilização dos modelos matemáticos de base física constituíram um ensaio que revelou bons resultados (Faria et al., 2015; Oliveira et al., 2015), sendo que o SHALSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994) tem obtido a preferência, com a obtenção de melhores classificações nos processos de validação.

O SHALSTAB é um modelo que combina a componente hidrológica com a componente de estabilidade (Montgomery et al., 1994). A modelação dos declives e das áreas de contribuição, elementos essenciais do SHALSTAB, faz-se por intermédio de Modelos Digitais de Elevação (MDE) com elevada resolução espacial, construídos a partir de sobrevoos a baixa altitude de veículos aéreos não tripulados (VANT). No caso da modelação das áreas contributivas, o recurso aos MDEs pressupõe o paralelismo entre os processos de escoamento interno e os processos de escoamento superficial. Desta forma se justifica que os vários modelos sobre escoamento interno se apoiam em MDEs na construção das áreas contributivas, tal como o D8 (O'Callaghan & Mark, 1984), MFD (Quinn et al., 1991), D<sub>∞</sub> (Tarboton, 1997). Neste ponto, pressupõe-se que a morfologia do terreno, representada pelo respetivos MDEs, permite a modelação dos processos de escoamento interno. O SHALSTAB utiliza o MFD para a modelação dos processos de saturação ao longo da bacia hidrográfica. Esse é o motivo para a avaliação da influência da resolução dos MDEs na modelação dos processos hidrológicos relevantes para a instabilidade de taludes em terraços agrícolas, o que pretendemos fazer para a RDD.

## TERRAÇOS AGRÍCOLAS E MODELAÇÃO DO FLUXO INTERNO

O conceito de vertente infinita está subjacente à modelação por com o SHALSTAB segundo a qual o processo de escoamento se faz de forma contínua e em paralelo à superfície topográfica, em “steady state”, sendo que a saturação do solo se faz de acordo com as características dos materiais e da topografia.

Com a construção de terraços agrícolas assiste-se a uma profunda alteração das características topográficas, com o respetivo aumento dos declives ao longo dos taludes e significativa diminuição ao longo das plataformas (fig.1). A alteração da topografia com a construção dos terraços agrícolas tem influência sobre os processos de escoamento à superfície, mas sobretudo ao nível do escoamento interno. O processo de infiltração é potenciado nas plataformas e a instabilidade é alargada nos taludes. O processo de escoamento interno paralelo à superfície topográfica, tal como admite o conceito do talude infinito, poderá ser acrescido pela infiltração ao longo das plataformas que apresentam elevada capacidade de infiltração, resultado da mobilização dos materiais pela construção dos terraços agrícolas (Fernandes et al, 2017a). Se a infiltração é um elemento importante na hidrologia dos terraços agrícolas, ela afeta sobretudo as camadas superiores dos solos uma vez que a condutividade hidráulica é muito restrita conforme se constatou em trabalhos anteriores (Faria et al., 2015; Oliveira et al., 2015).

É, portanto, de admitir que uma parte importante dos processos de saturação ao longo das cicatrizes dos deslizamentos se faça por fluxo interno, ao longo de caminhos preferenciais e a profundidades superiores a 1m, à semelhança do que foi observado nas mesmas formações geológicas de Bateiras e de Ervedosa do Douro (Fernandes et al, 2017b).

Assim sendo, a componente hidrológica do SHALSTAB, com base no conceito de talude infinito, deverá ser modelada tendo em conta o processo de escoamento interno paralelo à superfície geral da vertente e não em função da topografia dos terraços construídos. O conceito de vertente infinita permanece como suporte teórico da modelação em áreas onde se construíram terraços agrícolas.

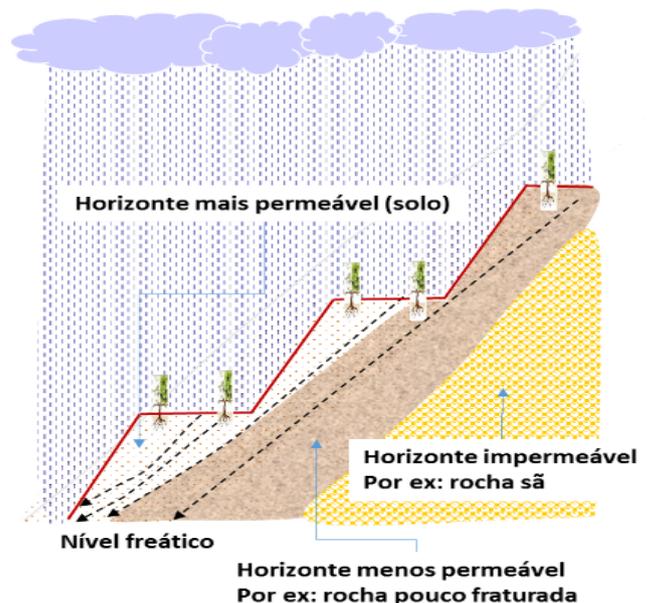


Fig. 1. Perfil de vertente, formações superficiais e variação do nível freático com armação de terreno em terraços de talude de terra.

## MODELAÇÃO DO ESCOAMENTO INTERNO E RESOLUÇÃO DE MDE

A ausência de paralelismo entre os processos de escoamento interno e superfície topográfica após o terracamento coloca um problema relativo à utilização dos MDEs na modelação da instabilidade desses taludes dos terraços. A componente de instabilidade necessita de MDE com elevada resolução, capaz de ser representativa da morfologia dos taludes dos terraços agrícolas, o mesmo já não acontece com a componente hidrológica. Inversamente, o modelo hidrológico MFD (Quinn, 1991) privilegia a definição dos caminhos preferenciais correspondentes do escoamento interno ao longo do conjunto das vertentes (e não só ao longo dos taludes dos terraços agrícolas). Os MDEs de muito elevada resolução modelam o escoamento ao longo das plataformas representando áreas contributivas muito restritas. Para ultrapassar esta questão é necessário produzir MDEs com resolução espacial mais generalizada, com capacidade de representação da configuração geral da vertente, previamente à construção dos terraços agrícolas. O trabalho que se apresenta testa a forma mais adequada de generalização de MDEs representativos do contexto geral da vertente, para a modelação do escoamento interno respetivo escoamento paralelo à superfície topográfica original.

### DIFERENTES TIPOS DE GENERALIZAÇÃO:

a) *Sobrevoos a diferentes alturas.* Neste trabalho, para a elaboração do MDE de 20cm de resolução espacial foi utilizado um voo a aproximadamente 100m de altura que obteve fotografias de 10cm de resolução espacial. Para a construção de um MDE de 1m de resolução espacial utilizaram-se fotografias com resolução espacial de 50cm obtidos a partir de voo de 5000m de altura. Com esta informação de base a resolução de 1m é a maior resolução possível de obter.

b) *Processamento com recurso a Sistemas de Informação Geográfica.* No caso de não haver fotografias resultantes de voos de mais elevada altura, o software SIG apresenta diferentes processos de generalização de cartografia matricial, sendo que eles diferem conforme os algoritmos que desenvolvem o processo de generalização. No presente trabalho utilizaram-se quatro processos de interpolação disponíveis no software SAGA GIS: Nearest Neighbour, Bilinear, B-Spline, Bicubic Spline. Os processos de generalização obtidos são diferentes e os MDEs construídos terão influência na modelação dos processos de instabilidade. Foram construídos quatro MDEs com resolução espacial de 1m, a partir de um MDE de 20cm, para cada um dos processos de generalização referidos, modelou-se a instabilidade de taludes agrícolas e validou-se os resultados.

c) *Construção de curvas de nível com equidistância elevada (5m).* Outro processo de generalização da informação a partir de MDE muito detalhados consiste na elaboração de curvas de nível com equidistâncias espaçadas de forma a generalizar as características de pormenor do relevo. No trabalho apresentado, a partir do MDE de 20cm elaborou-se uma carta hipsométrica de isolinhas com equidistância de 5m. Com base nessa hipsometria construiu-se um MDE com 1m de resolução espacial.

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para cada um dos MDEs de 1m de resolução foi elaborada uma carta das áreas contributivas para a bacia da Quinta das Carvalhas (fig. 3) e desenvolveu-se o processo de modelação

da suscetibilidade a deslizamentos nos taludes dos terraços agrícolas com recurso ao SHALSTAB (fig. 5). Considerando que a componente de instabilidade é construída com base em cartas de resolução de 40cm para todos os modelos, obtivemos 6 mapas de suscetibilidade a deslizamentos em taludes (fig.5) e procedeu-se à validação segundo o método da Matriz de Contingência (tab. 1).

a. *Componente hidrológica.* A utilização de MDEs de elevada resolução para a geração de MDEs de menor resolução, recorrendo à exportação por intermédio de processos de interpolação, produz cartografia que mantém o conjunto de aspetos morfológicos de detalhe, não se constituindo em verdadeiros processos de generalização dos aspetos gerais do relevo (modelos A,B,C e D). A exportação de resolução espacial de 0,04 cm<sup>2</sup> por pixel para 1m<sup>2</sup> corresponde a multiplicar por 5 a área do terreno representado. Contudo, a configuração geral dos terraços construídos permanece representada no MDE e a modelação dos processos de escoamento reflete essa morfologia. Como consequência de 85% a 86% da área da bacia hidrográfica nos modelos A,B,C e D correspondem a áreas contributivas inferiores a 50m<sup>2</sup>. Entre 8 e 9% da área da bacia corresponde a áreas contributivas entre 50m<sup>2</sup> e 100m<sup>2</sup>. Cerca de 4% da área corresponde a valores entre 100m<sup>2</sup> e 200m<sup>2</sup> e só 2% é superior a 200m<sup>2</sup>. Áreas superiores a 400m<sup>2</sup> são residuais nestes modelos (fig. 2).

Os modelos que resultam de informação de base de menor escala apresentam uma melhor distribuição das áreas contributivas. As áreas dominantes correspondem a valores inferiores a 50m<sup>2</sup>, variando entre 27% (curvas de nível de 5m – modelo E) e 41% (fotogramas de 50cm – modelo F). Os valores mais baixos correspondem a áreas de 400 a 800m<sup>2</sup> e superiores a 800m<sup>2</sup>. As maiores diferenças correspondem aos valores entre os 50m<sup>2</sup> e os 200m<sup>2</sup> com 47% e 31% para o E e o F, respetivamente.

Os modelos construídos por interpolação têm um decréscimo muito elevado de frequência de ocorrência na transição entre a classe inferior a 50m<sup>2</sup> e as classes superiores. Em contrapartida essa variação brusca não ocorre nos modelos E e F. Nestes verifica-se que há decréscimo mais progressivo que nos modelos A, B, C e D. Os modelos E e F apresentam uma frequência de ocorrência significativa para áreas superiores a 400m<sup>2</sup>, variando entre 6% a 10%, em contraste evidente com os outros modelos.

Na configuração geral dos mapas das áreas contributivas é notória a influência dos terraços agrícolas e vias de comuni-

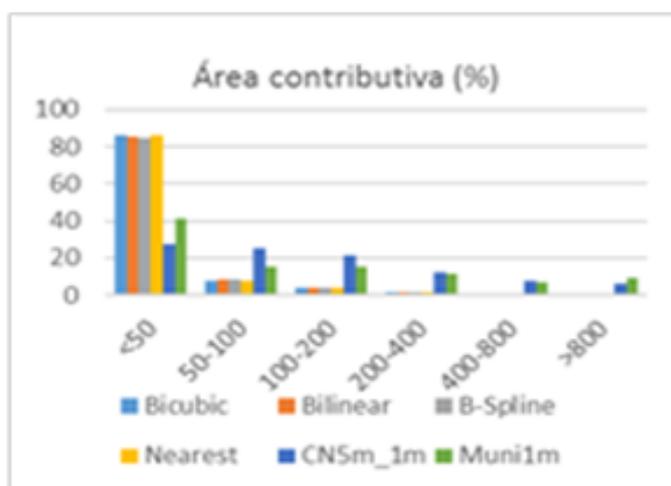


Fig. 2. Percentagem de área contributiva por classe, modelada a partir do Multiple Flow Direction (MFD).

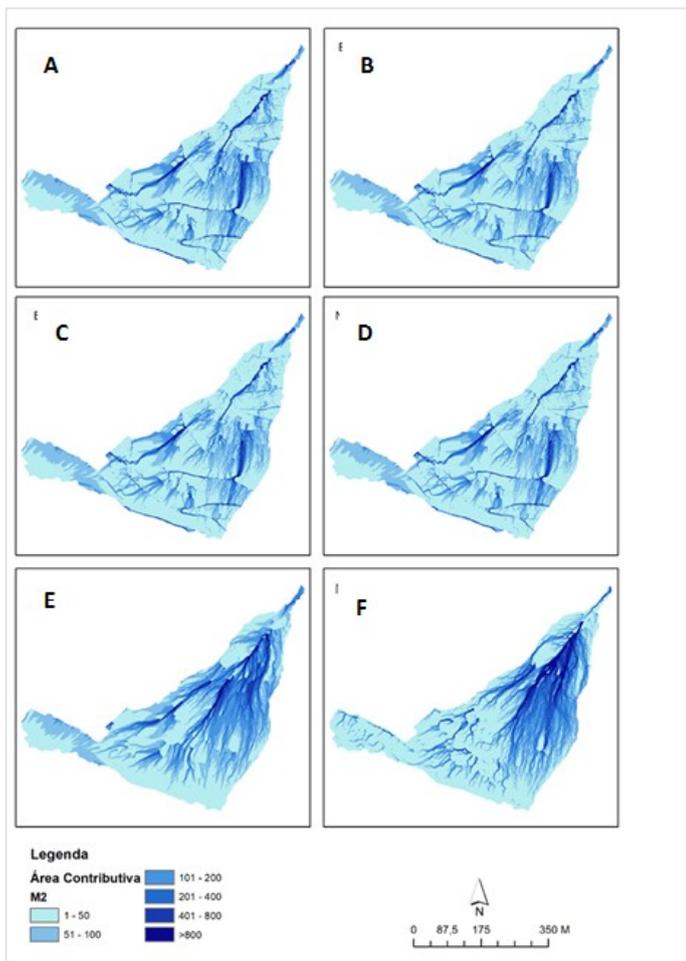


Fig. 3. Áreas contributivas com base em MDE construídos a partir da generalização de MDE de 20cm de resolução. A – Interpolação Bilinear, B – Interpolação Bicubic, C – Interpolação Bilinear, D – Interpolação Nearest Neighbor, E – Com curvas de nível de 5m de equidistância, F – a partir de fotografias de 50cm, com voo a 5000m de altura.

cação na modelação dos processos hidrológicos pelo MFD nos modelos A,B,C e D. Uma observação mais detalhada permite observar essa influência, o que justifica a existência de uma elevada frequência de áreas contributivas da classe inferior a 50m<sup>2</sup>. Cada plataforma de terraço funciona como um elemento de nível de base que, apesar da generalização em 5x feita com os interpoladores, continua a distorcer a modelação do escoamento interno. O mesmo se passa com a influência das estradas e caminhos rurais cuja dimensão ultrapassa, em geral, a dimensão dos terraços agrícolas. Para ultrapassar esta situação e manter o uso dos interpoladores teríamos de utilizar pixels com 5m de lado. Contudo, a modelação da instabilidade com o SHALSTAB perderia a capacidade preditiva decorrente da perda de resolução dos modelos finais de suscetibilidade ao longo dos taludes.

Em contrapartida, a modulação com base nos modelos gerados a partir das curvas de nível ou com base nos fotografias de 50cm de resolução geram áreas contributivas com frequências menores que as dos modelos baseados nos interpoladores nas classes mais baixas (fig. 4) e têm valores maiores nas classes mais elevadas. No modelo E os valores variam entre 22% a 27% para áreas contributivas inferiores a 200m<sup>2</sup>. Para as restantes classes ocupam 26% da bacia hidrográfica. No caso da modelação a partir dos fotografias as áreas contributivas inferiores a 50m<sup>2</sup> ocupam 41% da bacia hidrográfica sendo que entre os 50m<sup>2</sup> e os 200m<sup>2</sup> os valores variam entre 12% e 16%. Com 17% da área da bacia hidrográfica situam-se as áreas contributivas superiores a 400m<sup>2</sup>.

b. *Componente de instabilidade.* A modelação da instabilidade com recurso ao SHALSTAB só é apresentada para a área de terraços agrícolas. Porém, não foi possível extrair os muros de pedra em seco da área apresentada que, apesar de pouco numerosos, têm influência na modelação da instabilidade. Por esse motivo em todos os modelos há cerca de 10% da área que está classificada como cronicamente instável, ainda não sendo possível excluí-la automaticamente do modelo. Além da área ocupada pelos muros, podemos concluir que nos taludes muito pouca área foi classificada como cronicamente instável. No extremo oposto há cerca de 45% da área classificada como sendo cronicamente estável. Corresponde ao conjunto das plataformas que são comuns a todos os modelos. Considerando que os valores são idênticos para todos os modelos, significa que, para além das plataformas, muito pouca área de taludes foi classificada como sendo cronicamente estável. Considerando que a modelação da instabilidade é baseada em parâmetros físicos e a cartografia dos declives é igual para todos os modelos, as diferenças que se registaram correspondem a variações nas áreas contributivas e são consequência da utilização das várias formas de construção do MFD. Essas diferenças verificam-se essencialmente nas classes intermédias da instabilidade. A instabilidade modulada com recurso a interpolações (A, B, C e D) apresenta baixa representação das classes de elevada instabilidade com valores entre os 22% e os 25% para a classe com menos de 50mm/dia. Em contrapartida, a modelação com base nas curvas de nível (modelo E) com equidistância de 5m têm valores que variam entre os 32% e os 38% para a mesma classe de instabilidade. De uma forma geral as classes de maior estabilidade são pouco representadas na modelação da instabilidade. Isso resulta do facto de estarmos a trabalhar a instabilidade em taludes de terraços agrícolas que, em geral, são pouco estáveis. Para as classes de precipitação diária superior a 50mm as áreas variam entre valores inferiores a 1% e os 10%. Ao contrário do que acontece para a classe de precipitação diária inferior a 50mm, nas classes superiores a 50mm/dia, os modelos de instabilidade A,B,C e D têm estas áreas mais extensas do que os modelos D e E.

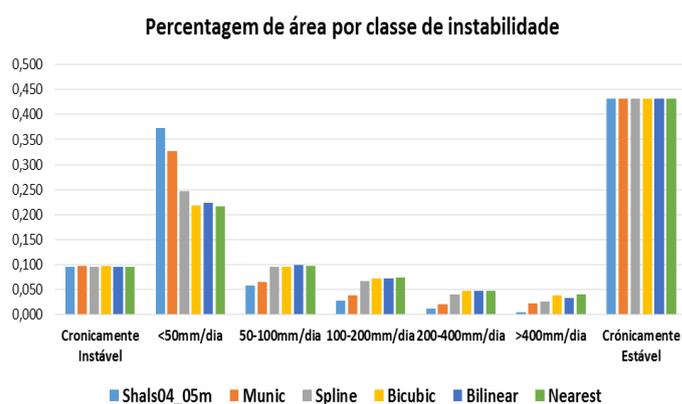


Fig. 4. Percentagem de área por classe de suscetibilidade.

## VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS FINAIS DA MODELAÇÃO DA INSTABILIDADE

A modelação da instabilidade a partir dos modelos feitos por interpoladores (modelos A,B,C e D) apresenta elevado valor preditivo com o Índice de Verdadeiros Positivos (TPR) variando entre 0,81 e 0,87 (tabela 1). Contudo, para os modelos construídos a partir de informação mais generalizada a capacidade preditiva é melhor com valores de TPR de 0,96 e

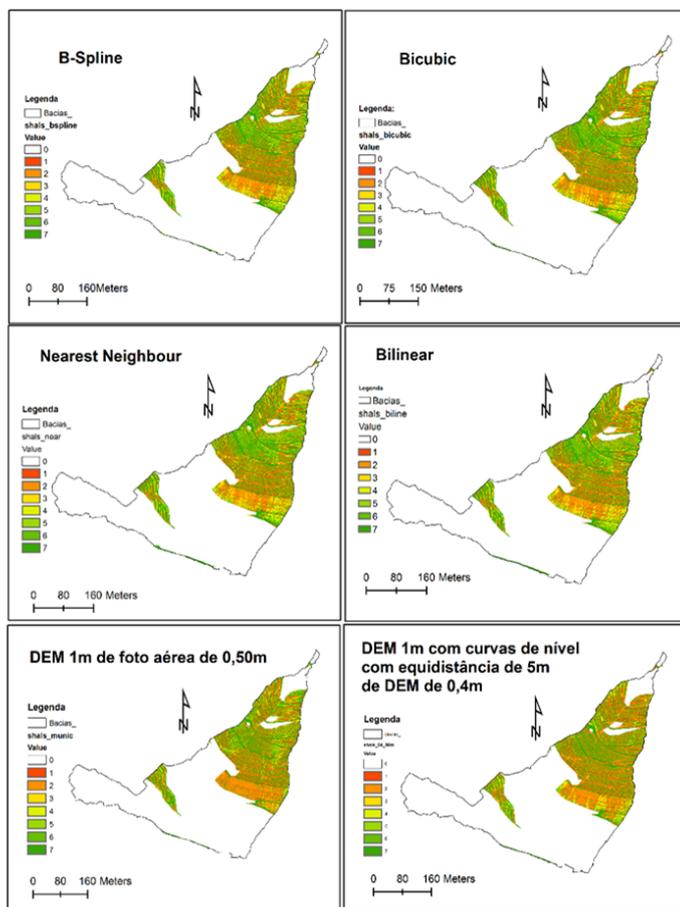


Fig. 5. Modelação da suscetibilidade a deslizamentos translacionais pelculares em taludes de terraços agrícolas, quinta das Carvalhas, Pinhão.

0,91 para E e F, respetivamente. Para todos os modelos há um equilíbrio entre as áreas definidas como instáveis no conjunto da área estudada, porém apresentam valores elevados para o Índice de Falsos Positivos (FPR). A melhor capacidade preditiva dos modelos E e F resulta desse facto o que lhe confere uma maior assertividade (ACC). A relação entre o TPR e o FPR é muito semelhante em todos os modelos, embora um pouco desfavorável para o modelo D. O melhor índice corresponde ao modelo B sendo que os outros são muito semelhantes. O modelo que melhor desempenho tem é o E pelo facto de ser o que mais instabilidade prevê, com 96% dos deslizamentos. De uma forma geral, os melhores modelos são os modelos E e E que são construídos com a informação de base mais generalizada.

## CONCLUSÃO

A modelação da componente hidrológica do escoamento interno na análise da instabilidade de taludes agrícolas não pode ser feita com base em MDEs que representam a topografia dos terraços agrícolas. Deve ser modelada a partir de MDEs generalizados e que representam a disposição geral da vertente. Este procedimento é essencial para uma correta aplicação do MFD e do SHALSTAB. A generalização de MDEs de elevada resolução produzida neste trabalho avaliou comparativamente dois tipos de metodologia: a partir de interpoladores disponíveis em SIG aplicados a MDE com resolução espacial de 20cm (b-spline, bicubic, bilinear, nearest neighbour), MDE produzido com fotografias de 50cm e MDE produzido com curvas de nível com equidistância de 5m. Dos modelos de instabilidade produzidos o que apresenta melhor desempenho corresponde

ao modelo E, elaborado pelo MDE de 40cm para a componente de instabilidade e pelo MDE que resulta da utilização de curvas de nível com equidistância de 5m construídas a partir de MDE de 20cm para a componente hidrológica (MFD). Os interpoladores disponíveis na SAGA GIS utilizados apresentam bons resultados, mas inferiores à modelação a partir de informação mais generalizada. Da informação mais generalizada destaca-se o modelo E (a partir de curvas de nível com equidistância de 5m) como tendo melhor desempenho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Faria, A., Bateira, C., Soares, L., Fernandes, J., Oliveira, A., Teixeira, M., Marques, F. (2015). *Instabilidade em terraços agrícolas no Vale do Douro, Pinhão : modelação matemática de base física*. Paper presented at the VII Congresso Nacional de Geomorfologia, Lisboa.
- Fernandes, J., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Oliveira, A., Hermenegildo, C., Gonçalves, J. (2017a). SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *CATENA*, 153, 39-49. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>
- Fernandes, J., Bateira, C., Costa, A., et al. (2017b). Electrical resistivity and spatial variation in agriculture terraces: statistical correlation between ert and flow direction algorithms. *Open Agriculture*, 2(1), pp. 329-340. doi:10.1515/opag-2017-0037
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171. doi:10.1029/93WR02979
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323-344. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Oliveira, A., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Fernandes, J., Hermenegildo, C., Gonçalves, J. (2015). *Estabilidade de taludes em terraços agrícolas na Região Demarcada do Douro : modelação de base estatística*. Paper presented at the VII Congresso Nacional de Geomorfologia: Lisboa.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59-79. doi:10.1002/hyp.3360050106
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and+- upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. doi:10.1029/96WR03137