

**Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos em taludes de terraços agrícolas:
modelos matemáticos de base física**

**EVALUATION OF LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY IN AGRICULTURAL TERRACES:
PHYSICALY BASED MATHEMATICAL MODELS.**

Carlos Bateira^a
carlosbateira@gmail.com

António Costa^b
afonso.costa@gmail.com

Joana Fernandes^b
joanafcfernandes@gmail.com

Bruno Fonseca^b
brunopomarelhos@hotmail.com

^aRISKAM-CEG-ULisboa/FLUP-UPorto.

^b Faculdade de Letras da Universidade do Porto

RESUMO

O vale do Douro interior apresenta extensas áreas de vinha que pertencem à mais antiga região demarcada dedicada à produção de vinho (RDD). Em virtude do forte encaixe do vale do Douro o plantio da vinha é feito em terraços agrícolas que apresentam diferentes graus de instabilidade. A modelação da instabilidade dos taludes dos terraços agrícolas utiliza modelos digitais de elevação (DEM) e, com base no conjunto de parâmetros físicos que caracterizam o terreno e a monitorização do comportamento hidrológico das vertentes, é possível modelar a variação espacial da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos superficiais translativos ao longo dos taludes de terraços, recorrendo ao modelo SHALSTAB.

Verifica-se que a resolução dos DEMs é um elemento essencial do processo de modelação, só possível com a aparição de processos de aquisição de imagens a baixa altura, capazes de construir DEMs de muito elevada resolução. No caso da utilização do SHALSTAB para a modelação da instabilidade dos taludes verifica-se que os melhores resultados advêm da combinação dos DEMs de maior resolução para a modelação da componente de instabilidade e os de menor resolução para a modelação da componente hidrológica. Com a validação pelas tabelas de contingência é possível identificar que a modelação que utiliza um DEM de 1m de resolução para a produção da área contributiva e de 40cm para a modelação dos declives constitui o modelo com melhor desempenho, apresentando uma capacidade preditiva de 97% dos deslizamentos. De entre os modelos com melhor capacidade preditiva, apresenta ainda uma razão entre o índice dos verdadeiros positivos e o índice dos falsos negativos de 2,1. A utilização das resoluções maiores (de 20cm e 40cm) revelaram ineficácia na previsão da maior parte dos deslizamentos em virtude da fraca aderência da modelação da área contributiva com a modelação dos processos hidrológicos subsuperficiais. Isto resulta da ausência de similitude entre o escoamento interno e a superfície topográfica profundamente alterada com a construção dos terraços agrícolas. Essa similitude existe entre a configuração geral da vertente, antes da organização em terraços agrícolas, e os processos de escoamento interno. Isto justifica o melhor desempenho da combinação dos DEMs de menor resolução para a componente hidrológica e os DEMs de maior resolução para a componente da instabilidade.

Palavras-chave: Terraços agrícolas, Deslizamentos, Douro, MDE e SHALSTAB.

ABSTRACT

The Douro Valley presents in the eastern region extensive areas of vineyards that belong to the oldest demarcated region dedicated to wine production (RDD). The instability modeling of the agricultural terraces base on the digital elevation models (DEM) and on the physical parameters that characterize the terrain, it is possible to model the spatial variation of the susceptibility to the occurrence of shallow landslides on terraced slopes, using the SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Model).

It is verified that the DEMs resolution is an essential element of the modeling process, only possible with the acquisition of images at a low altitude, capable to build DEMs of very high resolution. In the case of SHALSTAB it can be seen that the best results become from the combination of higher resolution DEMs for the modeling of the instability component and the lower resolution ones for modeling of the hydrological component. With the contingency tables validation it is possible to identify that the model that combine a DEM of 1m resolution for the contributory area and a DEM of 40cm for the instability modeling of the riser terraces has better performance, presenting a predictive capacity of 97% of the landslides. Among the models with the best predictive capacity, there is also a relation between the true positive index and the false negative index of 2.1. The use of higher resolutions (20cm and 40cm) revealed inefficiency in the prediction of most landslides due to the low efficiency to model the internal flow. This results from the absence of similarity between the internal flow and the topographic surface deeply modified with the construction of the agricultural terraces. This similarity exists between the general topographic configuration of the slope and the internal flow, before the organization in agricultural terraces. This justifies the better performance of the combination of the lower resolution DEMs for the hydrological component and higher resolution DEMs for the instability component.

Keywords: Agricultural terraces, Landslides, Douro valley, DEM and SHALSTAB.

INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas o Vale do Douro sofreu uma importante alteração no tipo de armação de terreno para o cultivo de vinhas. Os terraços suportados com paredes de pedra em seco são substituídos por terraços com taludes de terra, em que a inclinação varia entre 100% e 175%. Esta mudança na paisagem permitiu reformular práticas agrícolas (favorecendo a mecanização) mas potenciou um grupo de problemas relacionados com a instabilidade de taludes. No Alto Douro Vinhateiro existem dois tipos de instabilidade de taludes. O primeiro, e o que provoca mais danos, é o deslizamento de terras ou fluxo de

lama. Este tipo de processos afeta uma grande extensão de áreas da vertente e mobiliza, a grande velocidade, uma quantidade avultada de materiais. Apesar da dimensão e dinâmica são pouco frequentes e de distribuição geográfica esparsa. Outro tipo de instabilidade relaciona-se com deslizamentos translacionais superficiais em taludes de terraços agrícolas. Estes verificam-se com maior frequência nesta região, causando implicações na produção vitivinícola.

O processo de construção dos terraços provoca uma elevada desagregação do solo na primeira camada até cerca de 1,5 metros de profundidade proporcionando uma elevada infiltração sobretudo nos primeiros anos após construção. Na ocorrência de episódios chuvosos moderados e prolongados verifica-se um aumento do fluxo interno pelos caminhos preferenciais em direção às camadas mais profundas do solo, 1.5 a 2 metros de profundidade. Este aumento da circulação interna está ligado com o processo de infiltração do fluxo nas áreas superiores da vertente que, progressivamente, se vai concentrar nas áreas mais baixas ao longo dos primeiros anos. Ao longo dos anos, a compactação dos materiais na plataforma promove uma redução da capacidade de infiltração e, conseqüente diminuição da importância do processo de infiltração.

Existem diversas técnicas, de monitorização de terreno que permitem discernir sobre o comportamento hidrológico e estrutural dos terraços agrícolas. A resistividade elétrica, que se apresenta como um método não-invasivo, é utilizada para caracterizar a estrutura e presença de água no solo. A capacidade de infiltração e a condutividade hidráulica, diretamente ligadas à hidrologia e caminhos preferenciais, apresentam-se como parâmetros utilizados nos modelos de suscetibilidade a deslizamentos de vertente. A textura, a coesão e o peso específico do solo definem sobretudo características que se relacionam com a porosidade e os agregados do solo, parâmetros que também incorporam os modelos de suscetibilidade à instabilidade de taludes de terraços.

Nas últimas duas décadas, a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolveu-se baseada em duas metodologias principais: de base estatística e de base matemática. A modelação estatística baseia-se na premissa de que as ocorrências passadas são a chave para explicar a instabilidade atual, esta análise é sempre apoiada com um inventário de ocorrências realizado no terreno. Os modelos matemáticos baseiam-se na premissa que os parâmetros físicos do solo explicam a instabilidade. A idealização da análise de instabilidade de vertentes em terraços agrícolas pressupõe uma análise prévia das condições de implementação dos terraços agrícolas de forma a evitar ocorrências e promover uma maior rentabilidade da produção agrícola.

O objetivo deste trabalho centra-se na apresentação de metodologias e resultados desenvolvidos, em terraços agrícolas, para a identificação de áreas potenciais de instabilidade, a fim de disseminar informação preventiva necessária aos gestores e produtores vitícolas.

MATERIAIS E MÉTODOS

1. Os solos derivados de formações metasedimentares têm uma espessura muito reduzida (fig.1) e constituem a grande maioria das formações que pertencem à Região Demarcada do Douro (RDD). De forma geral são constituídos por materiais de textura fina, (variável entre 40% a 60% de silte e argila), importante pedregosidade (30% de elementos grosseiros) e ainda uma fração arenosa (20% a 30%). Sendo solos muito pouco espessos e pouco evoluídos estão sujeitos a intensos processos erosivos. De uma forma geral, os solos sobrepõem-se a formações metasedimentares muito pouco alteradas e/ou fraturadas apresentando uma transição brusca. Esta disposição estrutural permite identificar um funcionamento hidrológico distinto de acordo com os diferentes níveis do perfil (fig. 1 - A). Os solos apresentam uma elevada percentagem de argila e silte (variando entre 30% e 50%, sendo o remanescente constituído por areias e cascalho) (fig. 2). Segundo o esquema da figura 1 os processos de escoamento propostos apresentam o paralelismo

do nível freático com a disposição topográfica e baseiam-se na teoria do talude infinito (fig. 3). Nas áreas mais profundas a condutividade hidráulica é muito reduzida em especial em profundidades próximas da rocha mãe. O efeito da infiltração continuada ao longo da vertente conduz à saturação das camadas inferiores do solo e promove o efeito de deslizamento no contacto com as camadas mais resistentes.

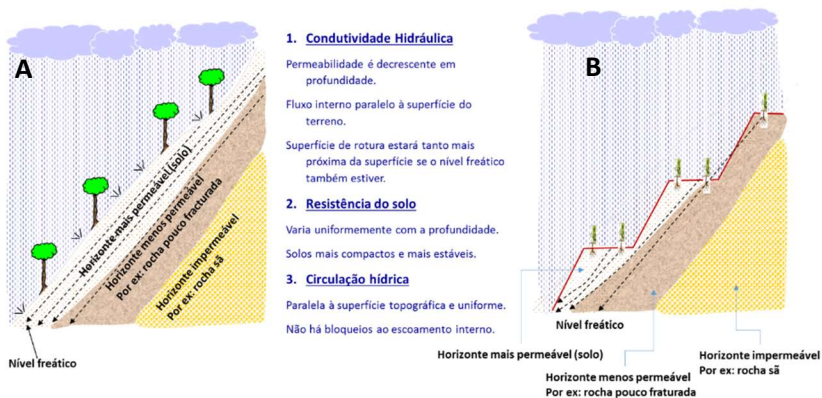
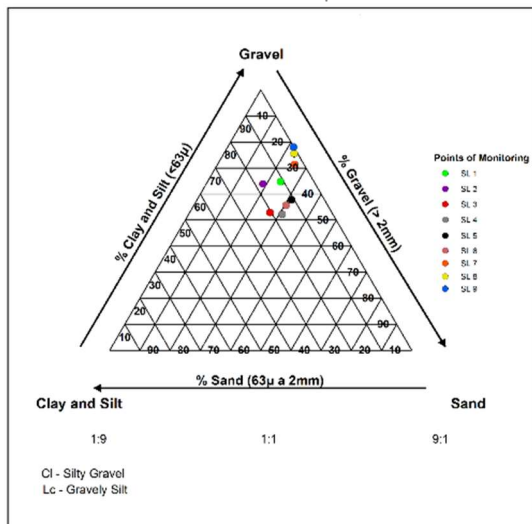


Fig. 1: Perfil de vertente instável; (A) formações superficiais e variação do nível freático e (B) idem com armação de terreno com terraços de talude em terra. Adaptado de WOLLE & CARVALHO,1989, in B. Vieira, 2007.



Cascalho (2-4mm) 15,8 – 31,1%,
Areia (62,5µm-1mm) 0,9 – 20,5%
Argila e silt (3,9-62,5µm) 52,5 - 75,6%

Fig. 2: Textura das formações superficiais nos terraços agrícolas.

Com a construção dos terraços agrícolas há uma alteração significativa dos processos hidrológicos que afetam as vertentes. As plataformas dos terraços propiciam a infiltração e o fluxo interno saturado que poderá transformar-se em fluxo superficial de forma mais fácil ao longo dos taludes em terra (fig.1 – B). O fluxo interno saturado, associado à água infiltrada no terraço poderão ser os responsáveis pela instabilidade dos taludes dos terraços agrícolas.

2. Modelos de análise da estabilidade em vertentes, considerando a teoria do talude infinito:

A teoria do talude infinito é a base da análise dos processos de instabilidade de vertente por meio de deslizamentos superficiais peliculares suportada pelos modelos matemáticos de base física. Esta teoria é baseada no conceito de fluxo em estado estacionário e faz depender os processos de instabilidade da espessura do solo, características dos materiais, da topografia, do nível freático e da circulação da água. Este conceito pressupõe que o funcionamento hidrológico da vertente e a saturação dos materiais que a constituem dependem diretamente dos contributos da precipitação para a circulação hídrica interna nos patamares agrícolas.

3. Modelo de talude infinito. Apresentação das variáveis.

Com o conceito de talude infinito aplicam-se as variáveis trigonométricas para o cálculo da espessura do solo a partir de sondagem vertical e estabelece-se a relação entre o conjunto de forças que promove a instabilidade (forças tangenciais) e as forças que potenciam a estabilidade (forças de atrito) dos materiais constitutivos das vertentes (fig. 3). Baseado na teoria de Mohr-Coulomb, o modelo SHALSTAB (Montgomery, D.R. and Dietrich, 1994) define a componente de estabilidade a que adiciona um modelo hidrológico expresso na relação entre a precipitação que, por infiltração e escoamento, atinge um determinado ponto da bacia hidrográfica e a transmissividade do solo (fig. 4). Esta interpretação dos processos pressupõe que o escoamento interno se faz paralelamente à superfície topográfica e depende da área de receção da precipitação na bacia hidrográfica. No sentido de concretizar esta combinação de modelos adotou-se o conceito de área contributiva que é modelada a partir dos algoritmos “flow accumulation” elaborados por diversos autores e disponível em diversos programas.

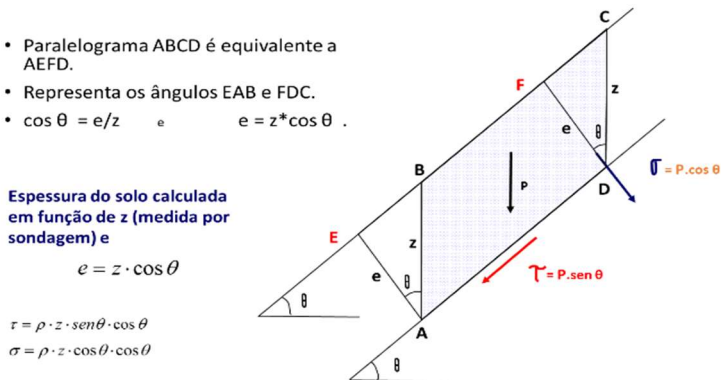


Fig. 3: Modelo da vertente infinita.

4. Algoritmos de modelos matemáticos de suscetibilidade. SHALSTAB, SINMAP, FS.

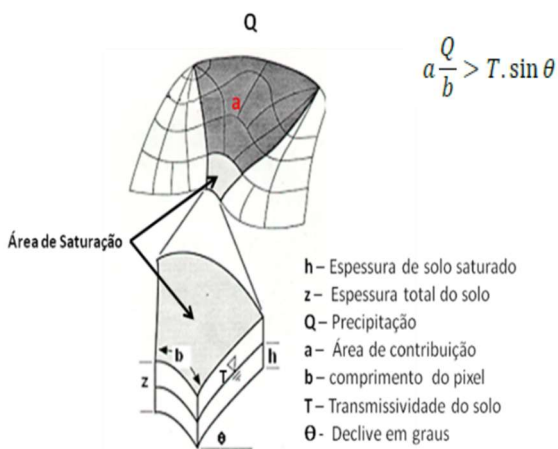


Fig. 4: Áreas contributiva segundo P. Quinn et al.

pelos diversos modelos. O Fator de Segurança utiliza a componente hidrológica suportada na espessura do solo saturado. Por outro lado, o SHALSTAB e o SINMAP suportam a análise com a construção de áreas contributivas, a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Os modelos hidrológicos utilizados são o Multiple Flow Direction (MFD) e o Deterministic Infinity (D^∞), respetivamente de P. Quinn et al. (1991) e D. G. Tarboton (1997). O MFD apresenta a distribuição do fluxo ao longo de direções múltiplas, o que contribui para a definição de escoamento ao longo de caminhos preferenciais nas vertentes potenciando uma interpretação dos escoamentos difusos mais limitados nas seções intermédias das bacias hidrográficas. O D^∞ permite uma concentração precoce dos processos hidrológicos o que favorece a existência de áreas muito extensas nas vertentes com escoamentos considerados difusos e com áreas contributivas muito restritas.

Do conjunto de modelos matemáticos que utilizam a componente hidrológica combinada com a componente de estabilidade destacam-se o SHALSTAB (Montgomery, D. R. and et Dietrich, 1994), SINMAP (D. G Tarboton, 1997) e Fator de Segurança (S. Sharma, 2002) (fig. 5). Pelas fórmulas utilizadas podemos verificar que há diferenças no tratamento da componente hidrológica

Desta forma, os processos de construção das áreas contributivas a partir dos MDE é um dos pontos fulcrais na eficiência dos modelos de avaliação da instabilidade dos terraços agrícolas. Partindo da assunção de que os processos de escoamento interno se desenvolvem em paralelo com a superfície topográfica, a componente hidrológica é modelada a partir do MDE (C. Bateira et al., 2014 e J. Fernandes et al., 2017). Isso significa que a morfologia do terreno, que resulta da construção dos terraços agrícolas, pode ter uma importância significativa sobre os modelos hidrológicos que integram os modelos de instabilidade.

Shalstab (Montgomery & Dietrich, 1994)

SINMAP (D.G. Tarboton, 1997)

FATOR DE SEGURANÇA (Sharma, 2002)

$\frac{Qc}{T} = \frac{\sin \theta}{b} \left[\frac{C'}{\rho w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho s}{\rho w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$	$IE = Cr + Cs + \frac{\cos \beta [\rho s g - (D - Dw) + (\rho s g - \rho w g) Dw] \tanh \phi}{D \rho s g \sin \theta \cos \theta}$	$FS = \frac{c' + h \times \cos^2 \beta [(1 - m) \gamma_m + m \gamma_{sub}] \times \tan \phi'}{h \times \sin \beta \times \cos \beta [(1 - m) \gamma_m + m \gamma_{sat}]}$ $m = dw / h$
<p><i>Qc</i> – Critical Rainfall. <i>T</i> – Transmissivity. <i>C'</i> – Soil cohesion. <i>a</i> – Contributing area. <i>b</i> – Terrain unity dimension. <i>pw</i> – Water specific weight. <i>ps</i> – Soil specific weight. <i>θ</i> – Slope inclination. <i>φ</i> – Internal friction angle.</p>	<p><i>Cr</i> – Root cohesion. <i>Cs</i> – Soil cohesion. <i>θ</i> – Slope angle. <i>pw</i> – Water density (kg/m³). <i>ps</i> – Soil saturated density. <i>g</i> – Gravitational acceleration (9,81 m/s) <i>D</i> – Vertical soil profundity. <i>Dw</i> – Vertical soil saturated column (m). <i>φ</i> – Internal friction angle.</p>	<p><i>dw</i> – espessura do solo saturado. <i>h</i> – espessura do solo potencialmente instável. <i>φ</i> – ângulo de atrito <i>C'</i> – coesão <i>β</i> – declive da encosta <i>γ_{sat}</i> – Peso volúmico saturado <i>γ_{sub}</i> – Peso volúmico submerso <i>γ_m</i> – Peso volúmico do solo</p>

Fig. 5: Modelos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente peliculares translativos.

Segundo a teoria do talude infinito o paralelismo entre escoamento interno e a topografia da vertente só é aceitável considerando o sentido geral do declive e não a morfologia dos terraços agrícolas. Considerando o elevado detalhe dos MDEs utilizados na modelação da instabilidade, não podemos utilizar, em simultâneo, escalas de trabalho detalhadas para a componente de instabilidade e para a componente hidrológica. Na componente de instabilidade há necessidade de representar em detalhe a morfologia dos terraços agrícolas, nomeadamente os taludes dos patamares, mas na componente hidrológica há que representar a tendência geral do declive da vertente, representativa do processo de escoamento interno definidos pelos modelos de instabilidade que utilizam o conceito de área contributiva, nomeadamente o SHALSTAB e SINMAP (fig. 5).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de instabilidade selecionado para modelar a instabilidade de taludes em terraços agrícolas no vale do Douro foi o SHALSTAB em virtude de potenciar a modelação do escoamento interno por intermédio de caminhos preferenciais tal como já demonstramos em publicações anteriores.

Produzimos 6 modelos de instabilidade recorrendo a quatro MDEs com resoluções espaciais diferentes. Utilizaram-se MDEs com pixel de 20cm, de 40cm, de 1m e outro de 5m dos quais resultaram 4 modelos de instabilidade (fig. 6, A a D).

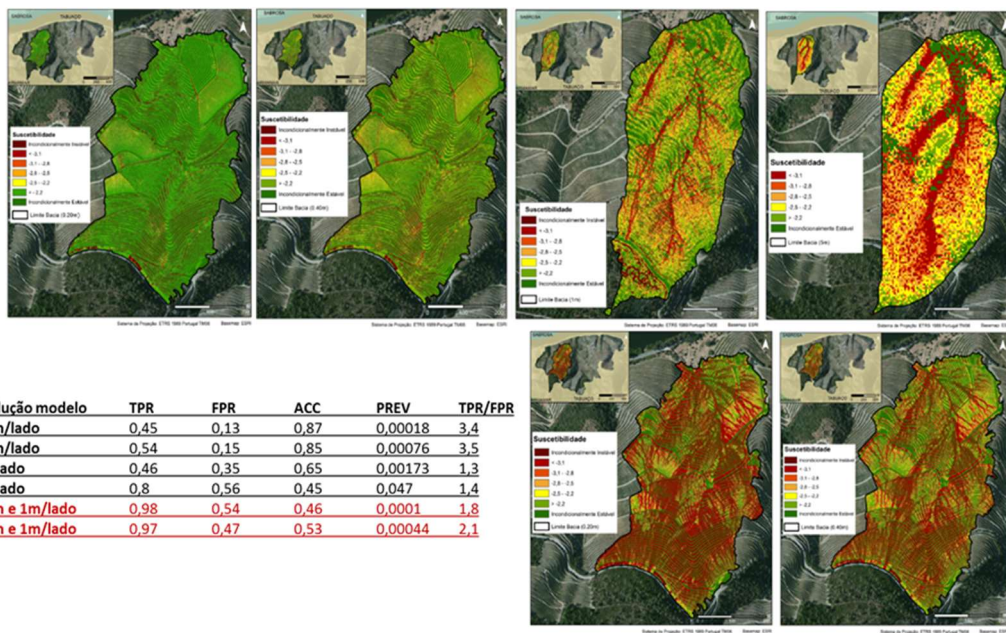


Fig. 6: Modelos de instabilidade, Quinta de S. Luís, Adorigo. Resolução espacial: A- 20cm, B- 40cm, C- 1m, D- 5m, E- 20cm para a instabilidade e 1m para a hidrologia e F- 40cm para a instabilidade e 1m para a hidrologia. Tabela com valores da validação segundo a matriz de contingência: TPR-True Positive Rate, FPR-False Positive Rate, ACC- Accuracy, PREV- Precision, índice TPR/FPR.

Adicionalmente construíram-se dois modelos com resoluções combinadas consoante a componente a representar. Para a componente de instabilidade utilizou-se os MDE de resolução espacial de 20cm e 40cm (fig. 6, E e F) e para a componente hidrológica utilizou-se o MDE com resolução espacial de 1m em ambos os modelos.

A validação foi feita com recurso ao inventário e através de tabela de contingência (Provost, F. and Fawcett, T. 1997). Os modelos A, B e C apresentam uma fraca capacidade preditiva que varia entre 45% e 54% (fig. 6) e, por isso, não devem ser considerados para efeito de avaliação de suscetibilidade a deslizamentos em taludes de terraços agrícolas. O modelo D melhora significativamente a capacidade preditiva com 80% dos deslizamentos identificados nas áreas cartografadas como sendo suscetíveis de instabilidade. Contudo, apresenta uma elevada área cartografada como instável. Os modelos E e F apresentam uma ainda melhor capacidade preditiva, de 98% e 97%, respetivamente. Apesar de aumentarem a capacidade preditiva relativamente aos outros modelos A, B, C e D, reduzem a área considerada como instável relativamente ao modelo D. O melhor desempenho destes dois modelos relativamente ao modelo D é bem patente no índice TPR/FPR. Neste índice apresentam valores superiores ao modelo D, sendo que o modelo F, com 2,1 é o que melhor desempenho tem.

Neste modelo são utilizados os MDE de 40cm para a componente de instabilidade e de 1m para a componente hidrológica.

Neste modelo a componente hidrológica (1m) tem uma generalização relativamente à componente de instabilidade (40cm) o que permite a modelação dos processos hidrológicos internos de acordo com o declive geral da vertente. No entanto, a resolução espacial da componente de instabilidade que melhor permite a modelação da suscetibilidade nos taludes não é a resolução de 20cm, mas a de 40cm. A resolução de 20cm é excessiva, representando todas as pequenas irregularidades ao longo do talude dos

terraços o que se revelou pouco rigoroso no processo de classificação dos valores da suscetibilidade. Com esta resolução pequenos setores dos taludes são classificados como estáveis, no interior de áreas de elevada suscetibilidade.

CONCLUSÃO

1. A modelação dos processos de escoamento interno com base no MDE deve considerar as alterações promovidas pela utilização e intervenções sobre o terreno.

A premissa admitida pelos algoritmos de modelação das áreas contributivas de que estas estão diretamente dependentes da topografia permite a utilização dos MDE como suporte à construção das áreas contributivas. Esta premissa é válida para o vale do Douro como já foi demonstrado em trabalhos anteriores (J. Fernandes et al., 2017). É possível admitir que os processos de escoamento interno estão diretamente correlacionados com as áreas contributivas modeladas pelo MFD, sendo que, para profundidades entre 1,5m e 2,5m a correlação é elevada. Contudo, apesar de menos relevante, a correlação com o D_{∞} é boa para profundidades até 1m. Esse fato resulta da alteração da estrutura dos solos promovida pela construção dos patamares agrícolas, destruindo potenciais caminhos preferenciais e promovendo o escoamento difuso. Para profundidades superiores, tendo em conta estes pressupostos, podemos assumir que os MDE são aceitáveis para a modelação do escoamento interno desde que sejam representativos dos caminhos preferenciais tal como acontece com o MFD.

2. Considerando a capacidade de generalização da informação promovida pelas escalas de representação mais reduzidas, podemos inferir que a representação feita com resoluções espaciais mais fracas dos MDEs, são mais representativas dos declives médios e da morfologia geral da vertente. Sendo que, o escoamento interno está diretamente dependente do contexto geral da vertente e não da disposição dos patamares agrícolas, podemos concluir que uma representação das áreas contributivas com recurso a um MDE mais

generalizado (neste caso de 1m de resolução espacial) está mais correta e deverá ser constituída como opção desejável comparativamente a resoluções que potenciam maior detalhe do terreno. Nem sempre a resolução mais elevada é a melhor opção.

3. Em contrapartida, a componente de instabilidade do modelo SHALSTAB necessita de uma boa representação do conjunto de taludes dos patamares agrícolas. Essa representação exige MDE com detalhe suficiente de forma que a fisionomia dos taludes esteja bem representada, independentemente de pequenas variações não representativas da morfologia dos patamares agrícolas. No caso dos terraços agrícolas do Douro a resolução de 40cm revelou-se adequada para a modelação da instabilidade de taludes.

4. Para uma boa definição dos DEMs ajustados à modelação, tanto da componente de instabilidade como da componente hidrológica necessita um bom conhecimento do funcionamento dos processos naturais, implica a realização de testes á resolução do DEM ajustada a esses processos, bem como a identificação das alterações ocorridas resultantes da intervenção humana.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo PT2020 integrado no projeto Cloudmapper em conjunto com os seguintes parceiros: ISA, ADVID sob a coordenação da empresa promotora SPINWORK.

REFERÊNCIAS

Bateira, C., Soares, L., Rodrigues, D., Moura, R., Teixeira, M., Santos, M. (2014) Movimentos de vertente no Norte de Portugal: importância do comportamento hidrológico das formações superficiais. Revista Brasileira de Geomorfologia v. 15, nº 4, www.ugb.org.br, ISSN 2236-5664.

J. Fernandes, J., Bateira, C., Costa, A, Fonseca, B., Moura, R. (2017), Electrical resistivity and spatial variation in agriculture terraces: statistical correlation

between ert and flow direction algorithms. *Open Agriculture* 2, ps329–340. DOI 10.1515/opag-2017-0037

Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30: 1153-1171

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

Provost, F. and Fawcett, T. 1997. Analysis and Visualization of Classifier Performance: comparison Under Imprecise Class and Cost Distributions. *KDD'97 Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Newport Beach, CA, Pages 43-48.

Sharma, S. (2002) Slope stability concepts. In: Abramson LW, Lee TS, Sharma S, Boyce GM (eds) *Slope stability and stabilization methods*. Wiley, New York, pp 329–461

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.

Vieira, B. (2007). Previsão de Escorregamentos Translacionais Rasos Na Serra do Mar (SP) a partir de Modelos Matemáticos em Bases Físicas. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Wolle, C. M. and Crvalho, C. S. 1994. Taludes Naturais. In F. F. Falconi and A. N. Jr. (eds), *Solos do litoral de São Paulo*. Associação Brasileira de Mecânica de Solos - Núcleo Regional de São Paulo - ABMS, São Paulo, pp. 180-203.