

Geometria dos terraços agrícolas e modelação da instabilidade de vertentes (Vale do Douro – Portugal)

Carlos Valdir de Meneses Bateira
Universidade do Porto, Porto, Portugal

p. 262-283

Como citar este artigo:

BATEIRA, C. V. M. Geometria dos terraços agrícolas e modelação da instabilidade de vertentes (Vale do Douro – Portugal). **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 19, n. 2, p. 263-284, ago. 2015. ISSN 2179-0892.

Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/102781>>. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2015.102781>.



Este obra está licenciado com uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional.

revista

Geo 
USP
espaço e tempo

Volume 19 • nº 2 (2015)

ISSN 2179-0892

Geometria dos terraços agrícolas e modelação da instabilidade de vertentes (Vale do Douro – Portugal)

Resumo

As estruturas construídas para o cultivo da vinha no vale do rio Douro (Portugal) devem adaptar-se às condições do terreno que, genericamente, apresentam declives acentuados, dado o encaixe ao longo do setor português da Meseta Ibérica. Os novos sistemas de terraços onde são implantadas as vinhas usam maquinaria pesada, produzindo uma nova geomorfologia e implicando uma dinâmica natural diferente, associada à instabilidade de vertentes e à erosão dos solos por escorrença. Os novos patamares não permitem a aplicação dos métodos de base estatística, uma vez que não se pode fazer inventário. Mas é possível aplicar modelos matemáticos de base física, já que só se usa o inventário para efeito de validação.

Palavras-chave: Terraços. Deslizamentos. Suscetibilidade. Modelação. Cartografia.

Geometría de terrazas agrícolas y modelación de inestabilidad de laderas (Valle del Duero – Portugal)

Resumen

Las estructuras construidas para el cultivo de viñedos en el valle del Duero (Portugal) deben adaptarse a un terreno que por lo general cuenta con fuertes pendientes dado la incisión del sistema fluvial a lo largo del sector portugués de la Meseta Ibérica. La instalación de los nuevos sistemas de terrazas agrícolas para plantar viñedos, utiliza maquinaria pesada que cambia la morfología del terreno y la dinámica asociada con la inestabilidad de laderas y la erosión del suelo por escorrentía. La nueva morfología y la dinámica no permiten la aplicación de métodos de evaluación de la susceptibilidad soportados en los modelos de base estadística, ya que no es posible establecer la relación entre las condicionantes y el inventario. Por otro lado, los modelos matemáticos de base física permiten esta evaluación porque el inventario sólo se utiliza en la validación final.

Palabras clave: Terrazas. Deslizamientos. Susceptibilidad. Modelación. Cartografía.

Geometry of agricultural terraces and slope instability modelling (Douro Valley – Portugal)

Abstract

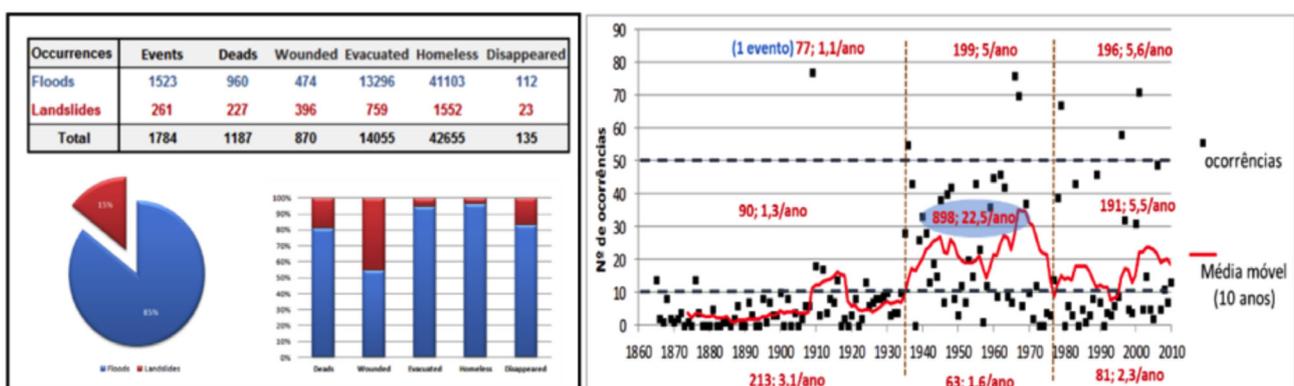
Structures built for the cultivation of vineyards in the Douro Valley (Portugal) must adapt to terrain that, generally, have steep slopes, given the deep incision along the Portuguese sector of the Iberian Meseta. The installation of new terracing systems for the vineyards, using heavy machinery, produce a new geomorphology and a different natural dynamics associated with the instability of slopes and soil erosion by runoff. The new geomorphology do not allow the application of statistical based methods for that evaluation since it is not possible to use the inventory. But it is possible to access to susceptibility with the mathematical physically based models since the inventory is only used for validation.

Keywords: Terraces. Landslides. Susceptibility. Modelling. Cartography.

Evolução das catástrofes hidrológicas e geomorfológicas de 1860 a 2010 em Portugal

Os desastres naturais são objeto de uma cada vez maior preocupação da parte das instituições nacionais e internacionais em virtude dos danos materiais e das vítimas humanas que provocam o que tem solicitado um interesse crescente para a constituição de bases de dados tanto a nível mundial como a nível nacional (Santos et al., 2014; Quaresma, 2009). Em Portugal foi desenvolvida uma base de dados que abrange o conjunto de ocorrências de carácter hidrológico e geomorfológico que afetam pessoas (Zêzere et al., 2014). Essa base de dados abrange o período entre 1860 e 2010 e regista o número de ocorrências com mortes, feridos, desaparecidos, desalojados e evacuados resultantes de cheias e movimentos de vertente (Figura 1). Seu principal objetivo é disponibilizar informação sistematizada por um período de tempo significativamente alargado que permita investigar e apoiar decisões no âmbito da proteção civil e do ordenamento em Portugal continental.

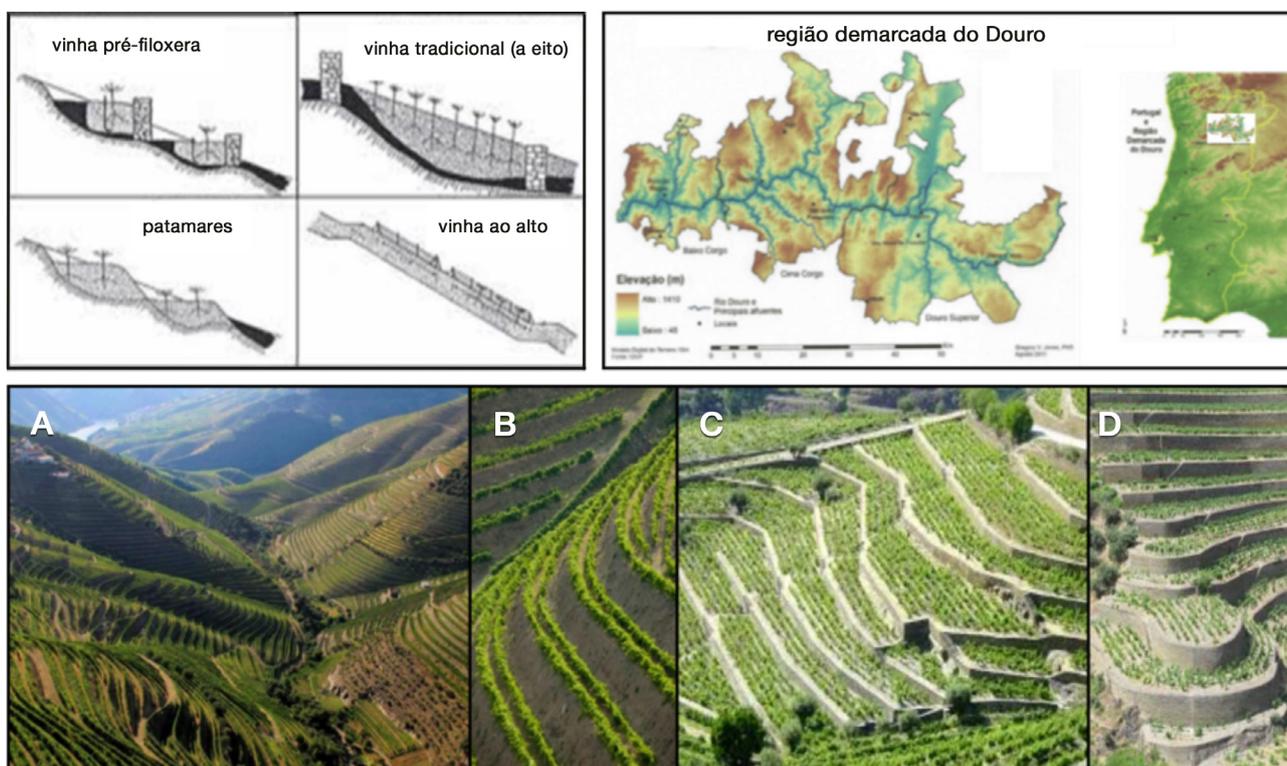
Figura 1 – Catástrofes hidrológicas e geomorfológicas em Portugal de 1860 a 2010



A instabilidade de vertentes no vale do Douro vinhateiro

O cultivo da vinha em plataformas construídas no vale do rio Douro já decorre há vários séculos sendo que desde o século XVIII se definiu a área demarcada dos vinhos do Douro, tendo sido objeto de forte regulamentação. Em 1860, a vinha foi afetada por uma praga (floxera) que provocou a destruição de parte significativa da viticultura. Para além de várias intervenções relacionadas com as castas resistentes à praga introduzidas na região do Douro, a solução do problema passou pela reorganização da forma de armação do terreno. Generalizou-se a vinha tradicional (designada vinha a oito), e nas áreas de declives mais fracos a vinha ao alto que permitia um maior arejamento das plantas e, dessa forma, tornar mais fácil o combate às pragas que afetam a vinha (Figura 2).

Figura 2 – Terraços agrícolas no vale do Douro. A e B – com talude em terra. C e D – com muros de suporte



Outra grande transformação no esquema de armação de terreno está em curso. O processo de mecanização da exploração vinícola levou à substituição dos socacos com muros de suporte pelos terraços agrícolas com taludes em terra, sendo que uma parte significativa da região demarcada do Douro já foi modificada (Figura 2). A construção dessas plataformas implica alterações significativas da geomorfologia dos terrenos. Uma nova geometria é organizada de acordo com as características do terreno sendo que a altura dos patamares, muito importante na estabilidade dos materiais, está diretamente relacionada com o declive médio das vertentes. A construção destas plataformas implica a modificação da estrutura e coesão dos solos, configurando alterações importantes nos parâmetros físicos que são responsáveis pela estabilidade dos taludes. Os processos hidrológicos associados às novas formas de relevo são

substancialmente diferentes dos que as precederam. A disposição horizontal da plataforma construída promove a infiltração contribuindo para um acréscimo de água ao fluxo interno a uma profundidade imediatamente abaixo das superfícies de plantio da vinha. Por outro lado a mobilização dos materiais pelas máquinas durante a construção permite a modificação muito significativa dos parâmetros importantes na estabilidade dos taludes, principalmente a coesão, que nos primeiros anos apresenta valores muito baixo.

Esta região apresenta-se como sendo uma das regiões de Portugal continental com elevada suscetibilidade a movimentos de vertente (Bateira; Soares, 1997). Porém, as plataformas construídas para o cultivo da vinha, com ou sem estruturas de suporte, constituem um fator adicional de instabilidade de vertentes. As suas características geomorfológicas associadas à forte intervenção humana para o cultivo da vinha propiciam o desenvolvimento deste tipo de processos.

Figura 3 – Deslizamentos do vale Douro. A – fluxo de lama na “vinha ao alto”. B – deslizamento afetando muro (armação pós-floxera). C – reconstrução de muro com técnicas tradicionais



A instabilidade de vertentes nas áreas de plantio da vinha no vale do Douro está associada a dois tipos de processos: deslizamentos de pequena dimensão ao longo dos taludes e muros dos patamares construídos (Figura 3B) e deslizamentos de maior dimensão que ocor-

rem independentemente da armação do terreno (Figura 3A). Os movimentos de vertente de maior dimensão são no essencial fluxos de detritos e de lama. Ocorrem na sequência de períodos de precipitação prolongados seguidos de um episódio chuvoso de forte intensidade (Pereira, 2009). São menos frequentes e a sua localização está associada a processos de concentração do fluxo interno ao longo de caminhos preferenciais. Mais esporadicamente poderão estar associados a intervenções antrópicas que alteram significativamente os processos de drenagem.

Os deslizamentos ao longo dos patamares agrícolas são de pequena dimensão e estão diretamente relacionados com a altura do patamar e, conseqüentemente com o declive médio da vertente (Figuras 3B e 3C). Estes são mais frequentes nas áreas de convergência do fluxo interno ao longo dos caminhos preferenciais de escoamento.

Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente em patamares agrícolas

O estudo da instabilidade de vertentes nos terraços agrícolas foi feito na quinta das Carvalhas, Pinhão, onde há informação sobre a existência de um grande número de deslizamentos de pequena dimensão associados aos taludes e muros dos terraços agrícolas. Esses processos estão diretamente dependentes da armação do terreno e, dada a frequência de ocorrência constituem um encargo significativo para as explorações agrícolas. Nesse sentido é essencial a investigação em torno da modelação da instabilidade de vertentes numa área que pode ser identificada como representativa de um relevo geomorfologicamente antropizado.

De uma forma geral tem sido aplicado em Portugal as metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente de base estatística (Zêzere et al., 2014). A ideia da modelação de base estatística pressupõe que a relação estatística do inventário com os parâmetros permanentes que condicionam a instabilidade constitui a base da predição da instabilidade futura. Porém, todo o processo de mobilização dos materiais para a construção dos patamares de plantio da vinha implica uma modificação muito profunda dos parâmetros físicos relacionados com a avaliação dos processos de instabilidade (coesão, textura, estrutura), o que torna difícil a aplicação destas metodologias em áreas onde a geomorfologia é totalmente modificada.

A modelação matemática de base física, independente de qualquer inventário, poderá ser aplicada nestas áreas de modificação geomorfológica recente. Contudo, qual o modelo a aplicar? Como se garante um bom ajuste do modelo à nova dinâmica geomorfológica?

No trabalho que se expõe aplicam-se vários modelos de instabilidade em áreas que já se encontram construídas durante um período de tempo largo e nas quais é possível inventariar processos de instabilidade relacionáveis com a geomorfologia atual. Com recurso aos inventários faz-se a validação dos modelos e avalia-se qual o que melhor se ajusta à instabilidade inventariada. Será esse que poderá ser aplicado nas novas áreas de patamares com características semelhantes.

Características físicas das áreas de análise

(a) Litologia

O vale do Douro é essencialmente constituído pelo complexo xisto-grauváquico que se caracteriza pela predominância de xistos intercalados por filitos e metagrauvaques (Sousa, 1982). A diversidade organizativa das estruturas permite a definição das seguintes formações: formação de Bateiras, formação Ervedosa do Douro, formação de rio Pinhão, formação de Pinhão, formação de Desejosa e, por fim, formação de São Domingos. A meteorização desse conjunto de formações geológicas origina o desenvolvimento de formações superficiais que são a base dos solos de textura fina. A generalidade dos patamares agrícolas construídos para o plantio da vinha é feito com base nestas formações superficiais cuja textura se apresenta com predomínio de argila e silte.

A área experimental (quinta das Carvalhas, Pinhão) é constituída pela formação de Bateiras, uma formação autóctone que se apresenta como a unidade estratigráfica mais antiga do grupo do Douro. Essa formação manifesta-se no núcleo de três estruturas anticlinais da primeira fase hercínica, nomeadamente no anticlinal de Abaças-Bateiras, no de Adorigo e no de Santo Adrião-Santa Leocádia. A formação de Bateiras pode ser dividida em dois grupos. O Membro Inferior caracterizado pela presença de xistos negros intercalado com metagrauvaques e filitos. O Membro Superior com a presença de níveis de calcários a que se sobrepõe espessos metagrauvaques com intercalações de filitos.

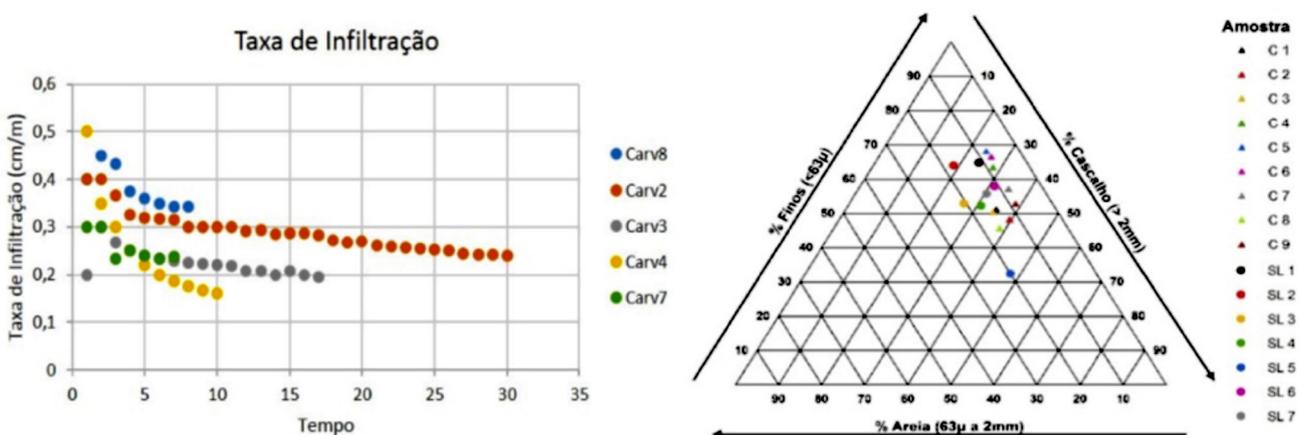
Na área de estudo, aflora ainda a formação de Ervedosa do Douro com a presença de termos pelíticos que são essencialmente filitos e quartzo-filitos de cor verde, cloríticos duros.

(b) Textura

A leitura do conjunto dos dados da textura, com cerca de 50 a 70% de finos, 15 a 20% de areias e de 30 a 40% de cascalho, podem ser classificados como lodosas cascalhentas (Figura 4). Esta textura explica grande dificuldade de desenvolvimento dos processos de infiltração na superfície dos patamares agrícolas.

(c) Capacidade de infiltração

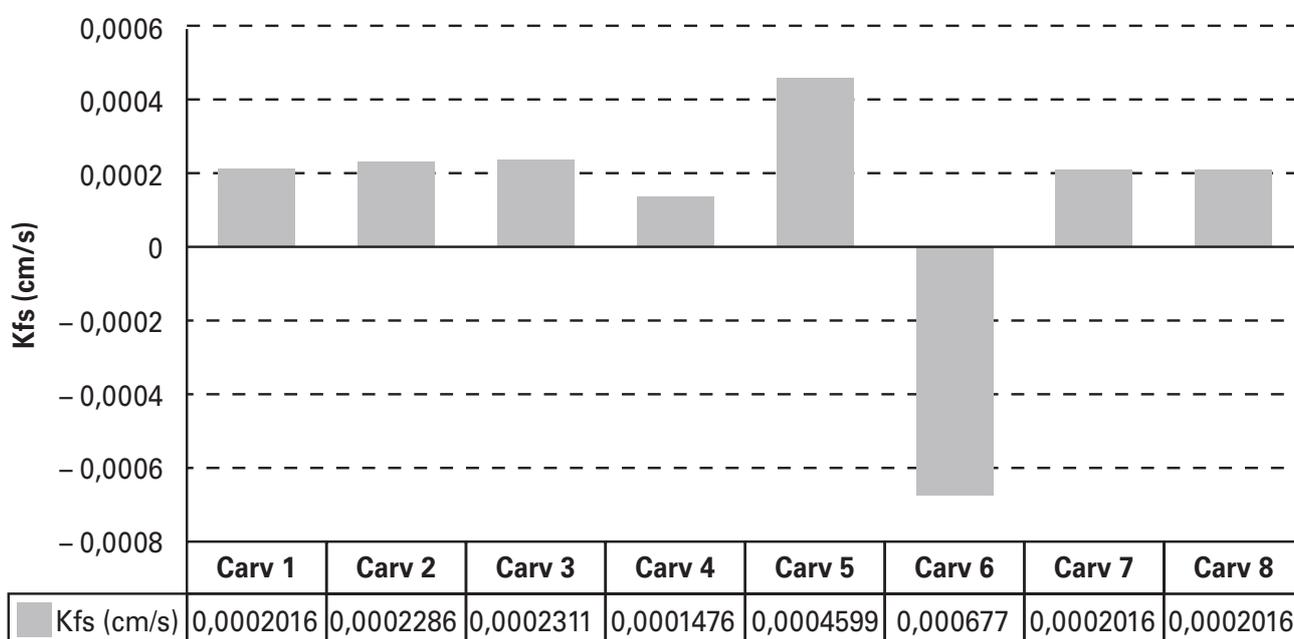
Figura 4 – Capacidade de infiltração e textura na quinta das Carvalhas



Valores de capacidade de infiltração na quinta das Carvalhas são muito baixos. Variam entre 140 milímetros por hora e os 210 milímetros por hora (Figura 4). Comparando com os valores observados em mantos de alteração granítica é possível verificar uma muito menor capacidade de infiltração. Nos mantos de alteração granítica, a capacidade de infiltração varia entre 200 mm/h e 350 mm/h, observados na serra da Aboboreira, no âmbito do projeto de investigação Processos Erosivos no Norte de Portugal, desenvolvido pelo departamento de geografia da Universidade do Porto (Soares, 2008). Ainda por comparação com os dados recolhidos no âmbito do projeto Terrisc (Pereira et al., 2007; Seixas et al., 2007), a capacidade de infiltração é muito semelhante, próximos dos 150 mm/h, consentâneos com a similitude das formações litológicas que dão origem aos solos que constituem os terraços agrícolas.

(d) Condutividade hidráulica saturada

Figura 5 – Condutividade hidráulica saturada na quinta das Carvalhas



Nos pontos de leitura da capacidade de infiltração foi medida a condutividade hidráulica com recurso do permeâmetro de Guelph. Os valores observados são muito baixos evidenciando uma deficiente circulação hidrológica nas camadas superficiais do solo (até 40 cm de profundidade), com variação entre 0,064 cm/h e 0,162 cm/h. Considerando que a parte superior dos solos dos patamares foi remexida pelas máquinas durante a sua construção esse valor é significativamente baixo, mesmo tendo em conta que com no decorrer dos anos se verifica um efeito de compactação desses materiais. Essa uniformidade reflete similitude textural das formações geológicas que constitui a área em análise. A textura fina (argila + silte) varia entre os 45% e os 70% e determina uma dinâmica hidrológica na qual a infiltração é muito deficiente, acompanhada por uma fraca condutividade hidráulica e uma grande capacidade de retenção de umidade. Este conjunto de características, associada à fraca inclinação das plataformas dos terraços agrícolas, é responsável por uma grande saturação dos solos e consequente instabilidade dos taludes.

(e) Peso específico do solo

Figura 6 – Peso específico do solo na quinta das Carvalhas

Peso do solo					
amostra	peso amostra + tubo (g)	peso do tubo (g)	volume do tubo	peso volúmico (g/cm ³)	kN/m ³
CARV 1	484	128	208,26	1,7	16,8
CARV 2	487	128	208,26	1,7	16,9
CARV 3	482	128	208,26	1,7	16,7
CARV 4	475	128	208,26	1,7	16,3
CARV 5	461	128	208,26	1,6	15,7
CARV 6	486	128	208,26	1,7	16,9

A avaliação do peso específico do solo foi feita com recurso a 6 amostras (Figura 6) o que permitiu identificar uma variação entre 15,7 e 16,9 KN/m³ sendo que a média é de 16,6 KN/m³. Considerando que toda a área experimental se situa numa única formação geológica (formação de Bateiras), a utilização do valor médio de 16,6 KN/m³, com um desvio padrão de 0,47, é aceitável. Com um valor de desvio padrão tão baixo optou-se por utilizar o valor médio par a modelação matemática de base física.

(f) Coesão

Foram desenvolvidas duas metodologias para o cálculo da coesão. Foram calculados os valores da coesão a partir de retro análise com recurso à fórmula do fator de segurança (Sharma, 2002). Assumiu-se como ângulo interno de atrito o conjunto de valores do declive das várias cicatrizes observadas nos deslizamentos nos taludes dos patamares cujos valores são próximos dos 40°. O declive da superfície topográfica utilizada no modelo de estabilidade corresponde ao valor atribuído ao declive do talude da superfície topográfica instabilizada, geralmente muito próximo do valor do ângulo de atrito. Por esse facto, também foi considerado o valor de 40°.

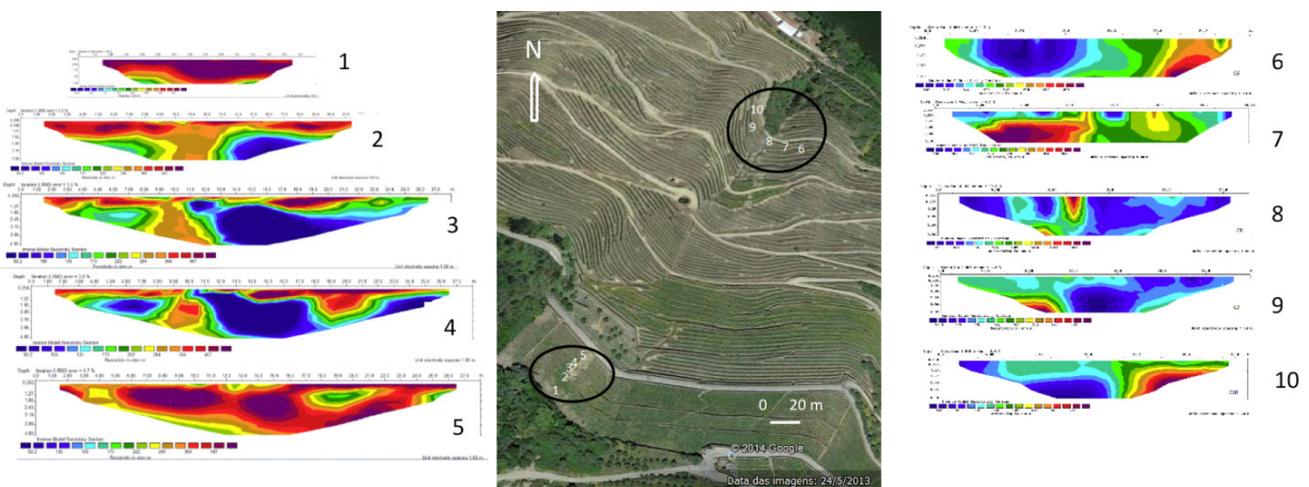
Foram colhidas 3 amostras e em laboratório foi calculada a coesão e respetivo ângulo de atrito. Foram registados valores de 3,8 KP/m² para a formação de Bateiras, desde que não seja afetada pelos trabalhos de construção dos patamares agrícola e de 2,9 KPa/m² nos materiais mais frequentemente deslizados. Os ângulos de atrito registados são muito próximos de 32°.

A discrepância entre os valores do ângulo de atrito calculado em laboratório e atribuído por retro análise relaciona-se com a morfologia dos patamares agrícolas e com o tipo de processos em análise: os deslizamentos translacionais de pequena dimensão e que ocorrem ao longo dos taludes. Com efeito, a leitura da coesão considerando o declive médio da vertente (com cerca de 33°) é relevante para a dinâmica dos deslizamentos de maior dimensão e que atingem maiores profundidades, ou seja, não diretamente influenciados pela morfologia criada pela construção dos patamares de implantação da vinha. Esse facto é concordante com os valores de coesão e ângulo de atrito calculados em laboratório. Por outro lado, os pequenos deslizamentos estão diretamente relacionados aos taludes dos patamares e dependem da morfologia construída para o plantio da vinha. Nesse sentido, a coesão dos materiais não remexidos pela atividade construtiva dos patamares é de 3,8 KP/m², condizente com a leitura por retroanálise, considerando a vertente com declive médio de 37°.

(g) Perfis de resistividade elétrica

Com o objetivo de obter informação sobre a estrutura do solo realizou-se a leitura da resistividade elétrica na bacia hidrográfica da quinta das Carvalhas. Os perfis abrangem a secção superior da bacia (Figura 7, perfis 1 a 5) e ainda a secção inferior (Figura 6, perfis 6 a 10), que corresponde a um dos setores mais instáveis relacionados com os movimentos de vertente em talude de patamar agrícola. Ao longo destes setores verifica-se que a resistividade elétrica apresenta uma grande variação, resultado de uma estrutura do solo muito diversificada e evidenciando uma forte anisotropia. Isso traduz-se na existência de importantes áreas com macroporos que constituem caminhos preferenciais de circulação hídrica, alternando com áreas de forte resistividade elétrica representativas de maior compactação dos materiais e mais difícil circulação da água. De todo modo, pode-se afirmar que junto das linhas de água principais os macroporos são mais abundantes e mais extensos, constituindo-se em locais de grande convergência de drenagem subsuperficial. Note-se que esses setores ocupam preferencialmente a base das vertentes e apresentam sistemas de drenagem superficial artificial. Porém, o processo de escoamento superficial não é suficiente para impedir a tensão exercida pela água nos solos. Embora a capacidade de infiltração e a condutividade hidráulica sejam muito fracas, a morfologia dos patamares agrícolas confere às plataformas quase horizontais as condições excepcionais para a adição de água ao solo, facilitando a saturação de macroporos e a instabilidade de vertentes.

Figura 7 – Perfis de resistividade elétrica – quinta das Carvalhas

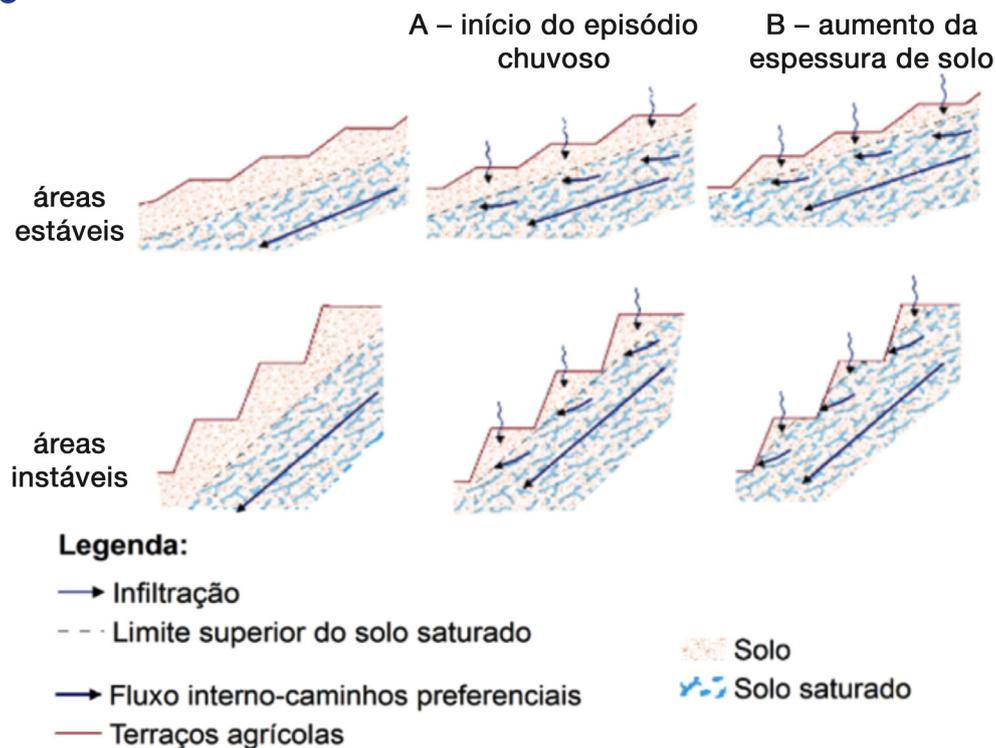


Processos hidrológicos e instabilidade de vertentes

A interpretação dos dados de campo permite a identificação dos processos de escoamento no solo, sugerindo a existência de dois processos predominantes de circulação hídrica, temporalmente coincidentes (Figura 8). Um relaciona-se com o fluxo interno rápido que usa macroporos com disposição longitudinal à vertente, e solicita a saturação dos materiais em caso de bloqueio ao processo de escoamento na sequência de um episódio chuvoso prolongado. O outro, fluxo interno lento, resulta do processo de infiltração ao longo das plataformas dos patamares por largos períodos de tempo, acompanhado por uma condutividade hidráulica muito lenta, e desenvolve-se ao longo da matriz argilo-siltosa. Apesar da diferença entre esses tipos de processo, eles são complementares. O fluxo lento por largos períodos de tempo contri-

bui para a manutenção de elevados níveis de umidade dos solos. Em períodos de maior adição de água ao solo os caminhos preferenciais acabam por ser funcionais e contribuirão de forma decisiva para o escoamento do excesso de água da parte superior da vertente para as secções inferiores. Em situações de elevados níveis de precipitação os dois processos contribuem para a saturação dos solos e promovem a instabilidade dos taludes dos patamares (Figura 8B).

Figura 8 – Modelo hidrológico em vertentes com terraços agrícolas no vale do Douro



Modelação hidrológica

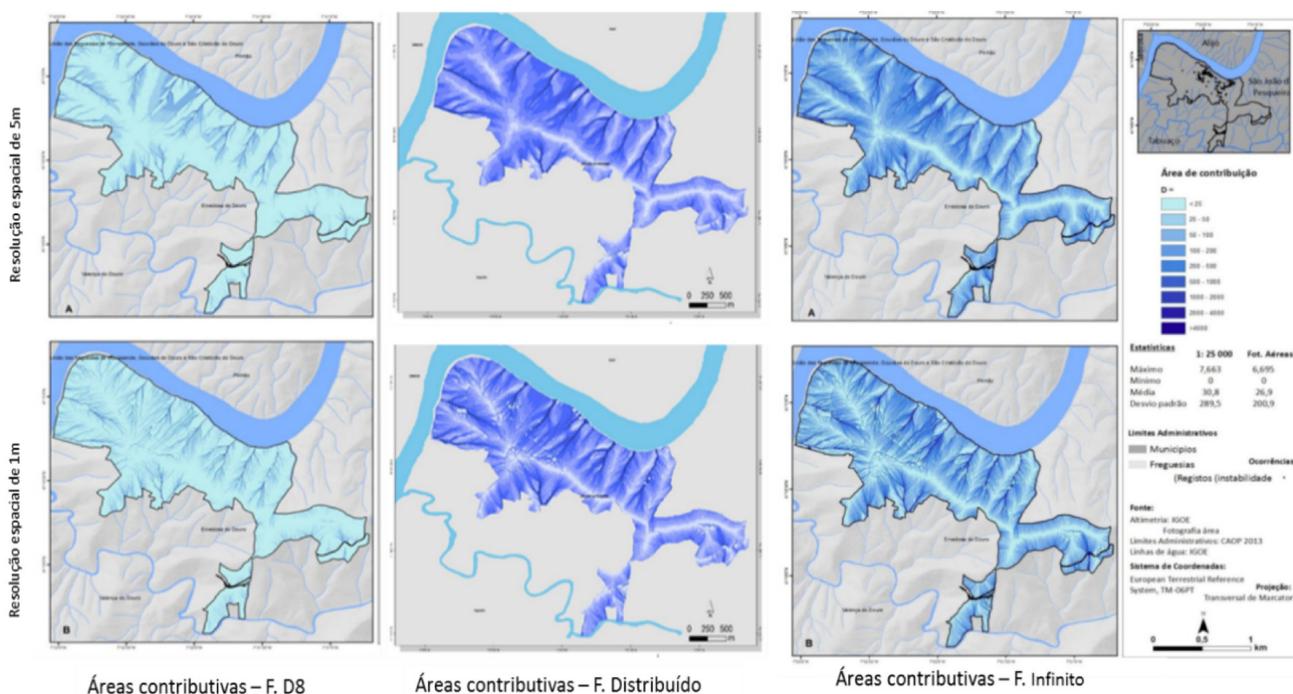
A modelação hidrológica baseada nos modelos topográficos parte da premissa que os processos de escoamento interno podem ser inferidos a partir das condicionantes superficiais do escoamento. Em áreas declivosas, a coincidência entre os processos de concentração hídrica à superfície e a concentração hidrológica subsuperficial é hipótese de trabalho para a construção dos modelos hidrológicos que integrem da modelação da instabilidade de vertentes (Bateira et al., 2014). Para avaliar a melhor opção para a modelação dos processos hidrológicos, cartografaram-se as áreas de contribuição calculadas a partir de modelos digitais de elevação de diversas resoluções e com vários métodos de cálculo do fluxo acumulado. Para cada método de modelação cartográfica do fluxo acumulado, aplicaram-se modelos digitais de elevação com resolução espacial de 5m e de 1m, construídos a partir de altimetria com curvas de nível com equidistância de 10 m e de fotografia aérea com resolução espacial de 50 cm, respetivamente (Figura 9).

Considerando diversos modelos digitais de elevação aplicou-se várias metodologias de cálculo dos fluxos acumulados. Utilizaram-se os seguintes modelos de fluxo acumulado: Fluxo D8, disponível com o software da Esri; o fluxo distribuído, disponível no Shalstab (Quinn et al., 1991) e o Fluxo D^∞ , utilizado pelo software do Sinmap (Tarboton, 1997) (Figura 9). Essa modelação dos processos hidrológicos foi utilizada nos vários cenários de instabilidade.

O primeiro MDE construído a partir de altimetria com equidistância de 10m e resolução espacial de 5 m generaliza os processos de escoamento e, dessa forma, reflete o funcionamento hidrológico global da vertente, não considerando a morfologia dos patamares agrícolas na modelação do fluxo acumulado. Ao contrário, o segundo modelo mais detalhado de resolução espacial de 1 m reflete as alterações morfológicas introduzidas com a construção dos patamares agrícolas para o cultivo da vinha no vale do Douro. Em cada um destes modelos digitais de elevação foram aplicados três procedimentos de cálculo do fluxo acumulado. Neste caso do fluxo D8 a modelação promove um procedimento mimético entre o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial ao longo das principais linhas de drenagem na vertente, o que não corresponde de todo ao que foi verificado na análise dos processos hidrológicos feita nas áreas experimentais.

A utilização do D^∞ potencia a distribuição que se assemelha ao funcionamento do fluxo subsuperficial ao longo de uma matriz isotrópica. O escoamento subsuperficial é modelado a partir da distribuição difusa do fluxo simulando o escoamento por percolação entre partículas do solo uniforme. Em áreas com declives tão acentuados, apesar da existência de plataformas horizontais, é pouco provável que o fluxo interno seja feito exclusivamente ao longo da matriz uniforme sem que se tenham desenvolvido caminhos preferenciais. Os caminhos preferenciais podem ser desenvolvidos a uma profundidade suficiente para que não tenha uma influência direta da morfologia dos patamares.

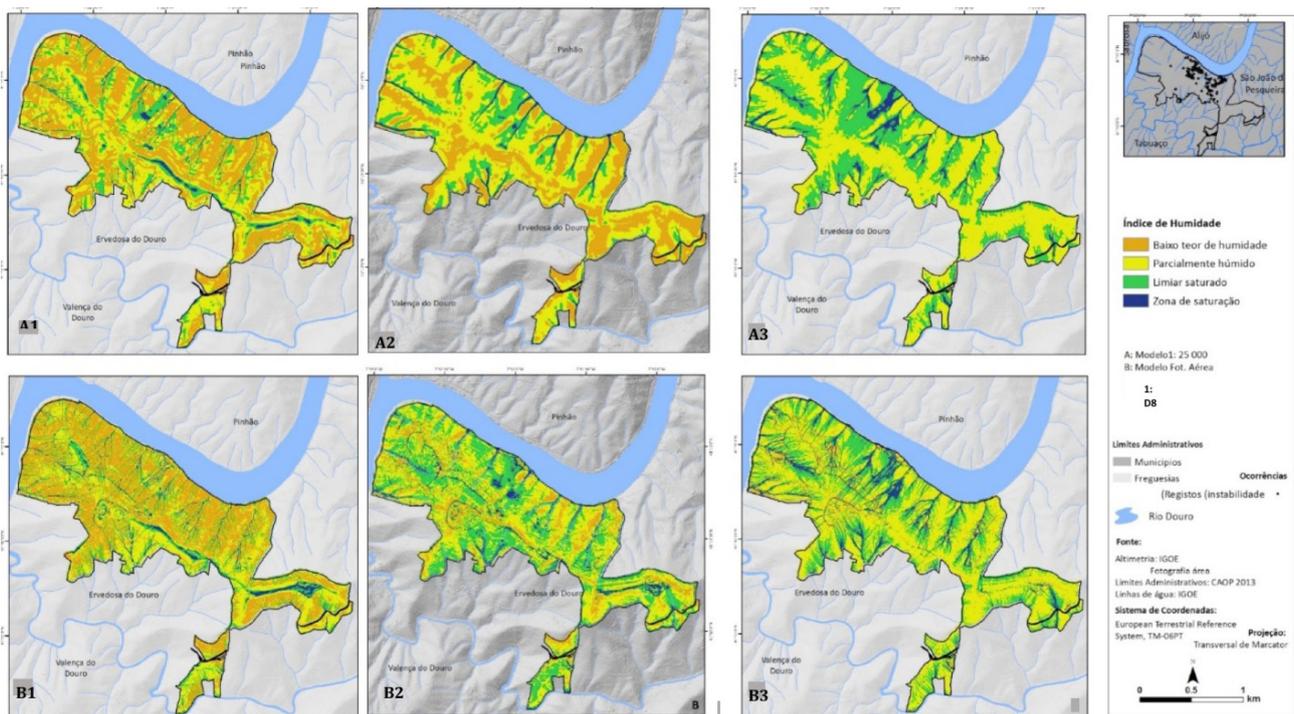
Figura 9 – Áreas contributivas calculadas a partir de modelos digitais de elevação, com diferentes resoluções espaciais



Por outro lado, os perfis de resistividade elétrica demonstram que os processos hidrológicos no solo não se desenvolvem no espaço de forma uniforme, testemunhando a existência de caminhos preferenciais. O fluxo distribuído apresenta-se como uma mode-

lação dos processos hidrológicos que faz a distribuição do escoamento de acordo com a variação da altitude do pixel utilizado. Este modelo de fluxo subsuperficial apresenta-se como agregador da modelação dos processos de escoamento ao longo da matriz do fluxo potencial e a modelação ao longo das linhas de água de escoamento preferencial. Admite a existência de escoamento difuso a par de escoamento ao longo de linhas preferenciais. A distribuição das áreas contributivas médias adquire um valor significativo, ao contrário do D8, com extensas áreas de muito baixa contribuição, e do D^∞ que minimiza as áreas contributivas médias a elevadas.

Figura 10 – Índice topográfico de umidade. A – resolução espacial de 5 m. B – resolução espacial de 1 m. 1 – D8. 2 – fluxo distribuído. 3 – D^∞



Índice topográfico de umidade

Com base nos vários modelos digitais de elevação e nos algoritmos que servem de base à elaboração da cartografia das áreas contributivas calculou-se o índice topográfico de umidade (ITU) (Figura 10). A modelação do ITU com base no D8 reduz significativamente as áreas saturadas e identifica-as essencialmente ao longo das linhas de água e áreas planas. Reflete, portanto, a grande capacidade de concentração do fluxo e a capacidade de infiltração na modelação das áreas contributivas. A modelação com base no D^∞ atribui uma extensa área ao conjunto das áreas saturadas e às áreas que se encontra no limiar da saturação, reflexo da dificuldade em definir linhas preferenciais do escoamento e das respetivas áreas contributivas. O ITU baseado no fluxo distribuído apresenta um equilíbrio na disposição das áreas analisadas por todas as classes de umidade, representando o essencial dos caminhos preferenciais e do fluxo difuso ao longo dos materiais que constitui a vertente.

A modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente

A modelação da instabilidade de vertente de base estatística está largamente aplicada em Portugal, preferencialmente na região N de Lisboa, no vale o Douro e no NW (Gerês), sobretudo ao nível do ordenamento do território e à escala 1:15.000. As várias modelações com base estatística apresentam taxas de validação elevadas que nos permitem concluir que podem ser aceites como válidas para a modelação à escala do município e no âmbito dos Planos Municipais de Emergência e Proteção Civil.

Porém, quando aplicamos estas metodologias ao vale do Douro, utilizando uma escala superior, a capacidade preditiva poderá ser questionada uma vez que a intervenção antrópica é muito elevada e altera significativamente a morfologia dos terrenos. Os parâmetros condicionadores que influem na modelação da suscetibilidade e que relacionamos estatisticamente com o inventário apresentam-se modificados pela armação dos terrenos o que só pode ser avaliado com o recurso a escalas de análise detalhadas. No vale do Douro procurou-se desenvolver dois tipos de modelação de base estatística: o valor informativo e a regressão logística.

(a) Valor informativo (VI) (Figura 11)

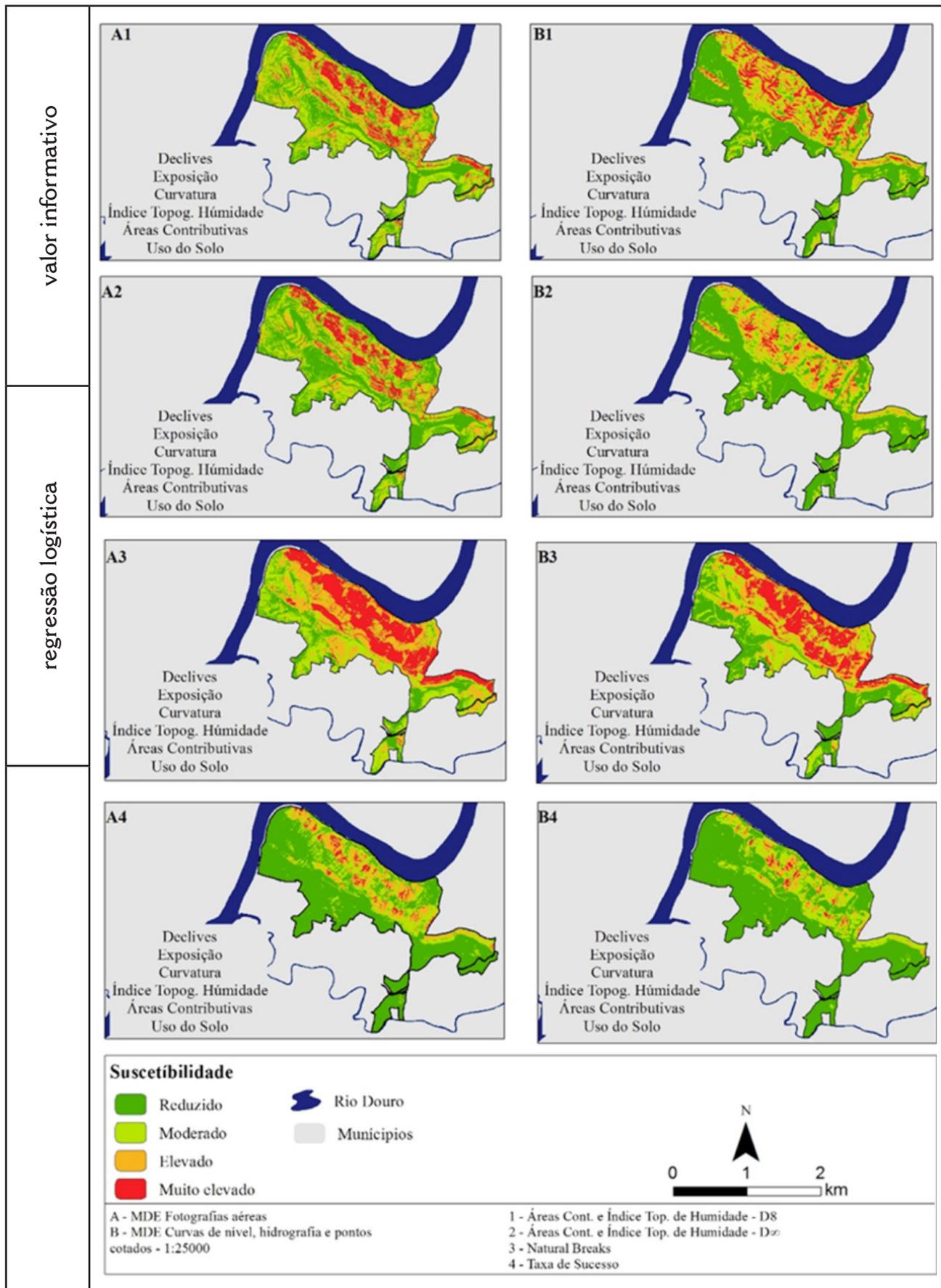
Para a aplicação do VI utilizou-se os seguintes fatores: declives, exposições, curvatura das vertentes, índice topográfico de humidade, uso do solo e áreas contributivas. Essa modelação apresenta-se com capacidade preditiva discriminante reduzida quando classificamos a informação com base nas quebras naturais. As áreas classificadas como forte a muito forte suscetibilidade conseguem prever quase todos os deslizamentos (99,4%) mas não discriminam áreas prioritárias de intervenção. A previsão elevada é feita à custa de um alargamento muito grande das áreas classificadas como elevada a muito elevada suscetibilidade, porventura abarcando áreas que não solicitam esse tipo de suscetibilidade.

Vários dos parâmetros utilizados foram construídos com base em dois MDEs com diferentes escalas de resolução espacial (5 m e 1 m). Paralelamente fez-se variar a cartografia das áreas contributivas baseadas em vários modelos de fluxo acumulado. Da combinação dos vários cenários podemos concluir pelo desempenho dos modelos de instabilidade construídos a partir do MDE de maior resolução, representativo da geomorfologia detalhada que caracteriza a intervenção humana no vale do Douro.

(b) Regressão logística

Considerando que os movimentos de vertente que servem de base à modelação da instabilidade são os de menor dimensão, localizados ao longo dos taludes dos terraços agrícolas, a regressão logística surge como um método que utiliza informação pontual na relação estatística com os fatores condicionantes. A utilizou-se os mesmos fatores condicionantes aplicados com o valor informativo. Por outro lado, a análise multivariada, característica da regressão logística, parece interpretar melhor a complexidade e inter-relacionamento dos parâmetros responsáveis pela variação espacial da suscetibilidade à instabilidade dos patamares agrícolas no vale do Douro.

Figura 11 – Suscetibilidade a movimentos de vertente de base estatística pelos métodos de valor informativo e de regressão logística



(c) Modelação matemática de base física

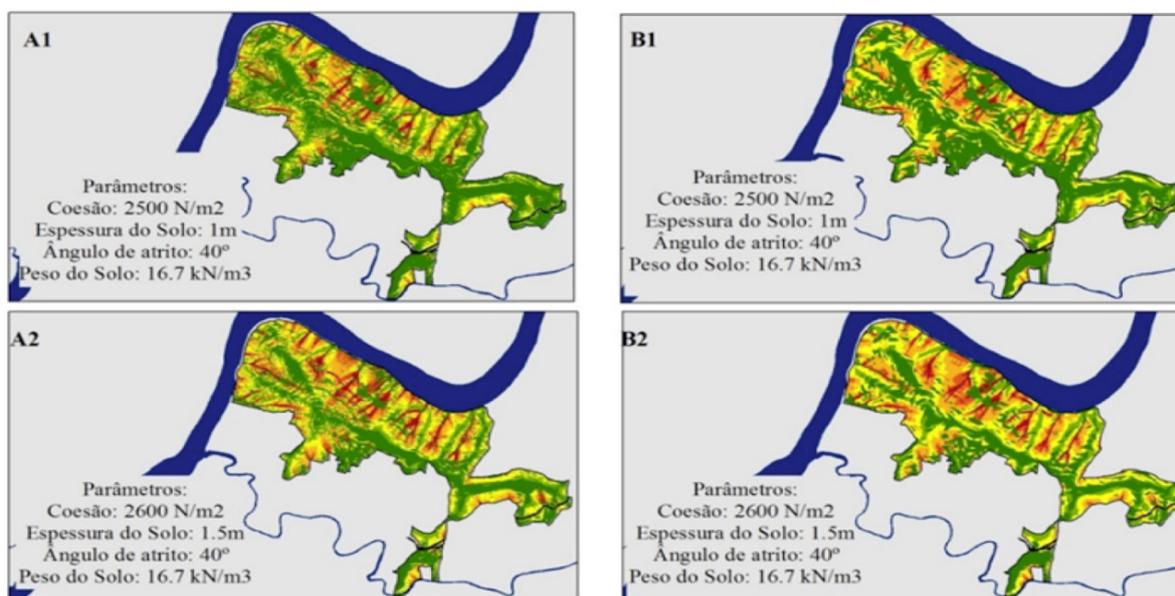
A modelação da suscetibilidade com base nos métodos matemáticos de base física utilizou dois modelos: o Shalstab (Montgomery; Dietrich, 1994) e o Sinmap (Pack; Tarboton; Goodwin, 2001). Baseados na teoria do talude infinito faz-se a associação do modelo de estabilidade com o modelo hidrológico. Para ambos foram utilizados os dois MDEs já aplicados ao VI.

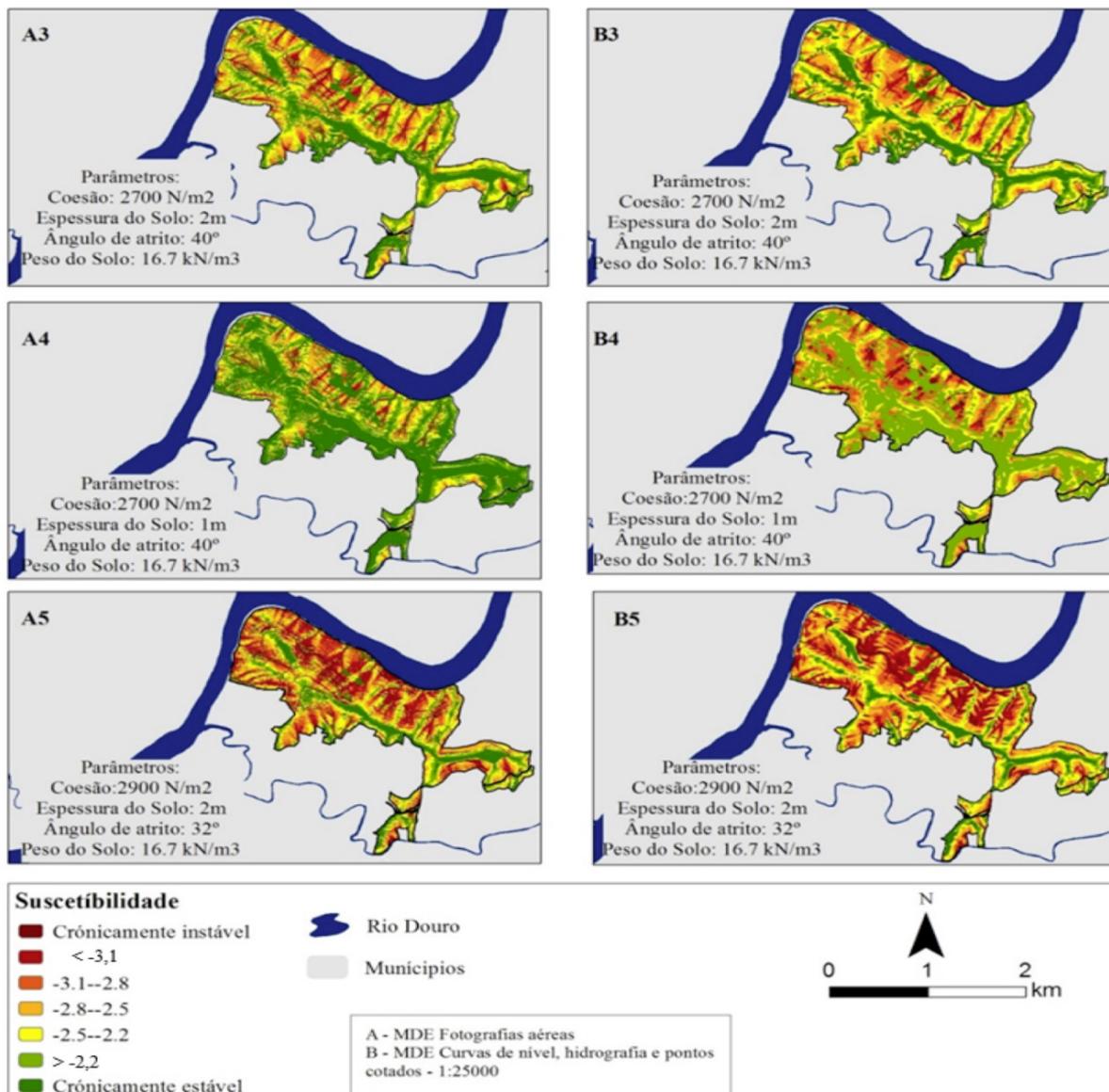
Para o Shalstab, construíram-se 10 modelos (Figura 12, 1 a 4) em que se fizeram variar a coesão, calculadas por retro análise e medida em laboratório (Figura 12, 5), ângulo de atrito (medido ao longo de superfície de deslizamento e em laboratório), a espessura do solo (variável sobre o terreno mas muito dependente das técnicas de armação do terreno) e o peso específico do solo (medido em laboratório).

Para o Sinmap fez-se variar a coesão máxima entre 2,7 e 2,5 KPa/cm² e o índice T/R para um valor máximo entre 1531,97 e 765,98 e para um valor mínimo entre 189,22 e 378,43, de acordo com 3 cenários de precipitação potenciais. Desta forma obtivemos 8 cenários de avaliação da suscetibilidade para cada modelo digital de elevação (Figura 13).

Mesmo considerando a grande variabilidade de cenários resultantes da variação dos valores atribuídos aos parâmetros físicos, este modelo apresenta uma forte coerência metodológica, derivada da modelação dos processos hidrológicos a partir da análise das áreas contributivas. Com efeito, considerando a uniformidade espacial dos parâmetros físicos que condicionam o modelo de estabilidade, o que decorre da uniformidade litológica da área de trabalho, o essencial da variação espacial da instabilidade analisada a grande escala (1:5.000), resulta da variedade espacial do modelo hidrológico e dos declives da superfície topográfica. Por isso, a resposta deste modelo apresenta uma discriminação espacial relativa coerente, fazendo variar a dimensão das áreas instáveis consoante a variação dos vários cenários. A validação do conjunto de cenários com recurso a inventário foi essencial para a seleção da proposta de avaliação da suscetibilidade que melhor se ajusta a estas áreas.

Figura 12 – Suscetibilidade a movimentos de vertente – Shalstab





A base dos vários cenários elaborados pelo Sinmap é o cálculo do rácio T/R, a coesão, a densidade do solo e da água. Utilizando os valores de precipitação e da transmissividade registados nas áreas de trabalho, da coesão por retro análise, da densidade do solo medida em laboratório, o valor de 1 à densidade da água, constituíram-se 6 cenários de suscetibilidade (Figura 13). A característica mais importante do Sinmap prende-se com a admissão da variabilidade de alguns dos parâmetros físicos considerado. Uma primeira observação indica a importância dos processos de infiltração ao longo dos patamares agrícolas, bastante visível com a utilização dos DEM de mais fraca resolução (pixel de 5 m). É possível verificar que o predomínio das áreas de maior suscetibilidade não acompanham de forma linear as linhas de escoamento superficial. Isso está associado à modelação hidrológica com base nas áreas contributivas definidas a partir do fluxo infinito (D_{∞}). Por esse fato, este modelo não privilegia o escoamento interno ao longo dos caminhos preferenciais. Ao contrário, simula um processo hidrológico ao longo das vertentes que é baseado num escoamento difuso, embora não deixe de atribuir às áreas de maior encaixe da rede de drenagem os valores mais elevados dos processos de fluxo acumulado. Essa

modelação parece ser mais consentânea com os processos de infiltração e escoamento em matriz de fluxo potencial nas plataformas dos patamares agrícolas. De modo geral, toda modelação suportada por MDEs de grande resolução exprime mais rigorosamente a instabilidade ao longo dos taludes dos patamares de plantio da vinha.

Validação da suscetibilidade na quinta das Carvalhas

Figura 13 – Suscetibilidade a movimentos de vertente – Sinmap

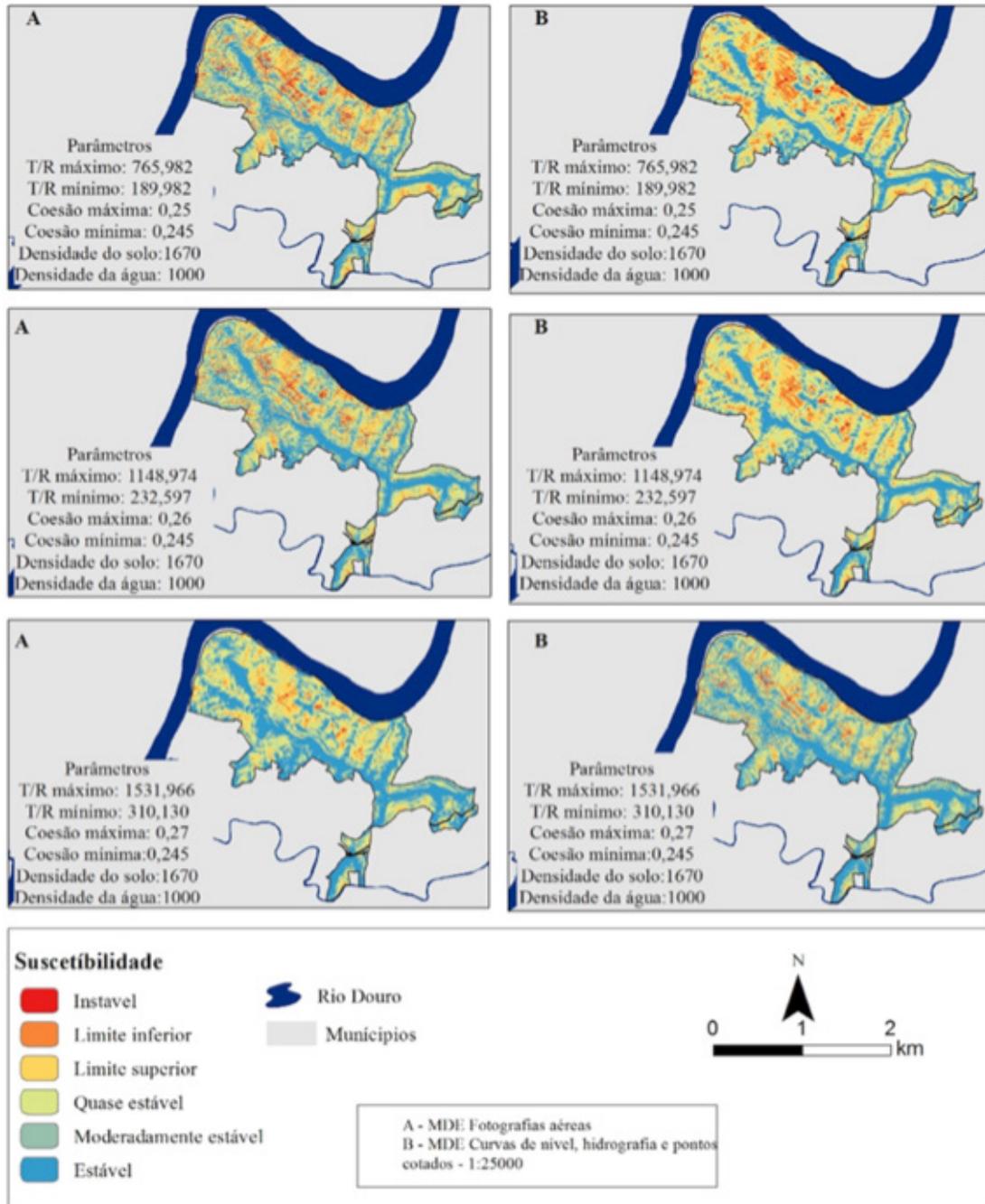


Tabela de contingência. Para o conjunto dos mapas elaborados foram desenvolvidos processos de validação com base na construção de tabelas de contingência (Kohavi; Provost, 1998) e identificação dos verdadeiros positivos/negativos e dos falsos positivos/negativos a

partir do inventário. Na modelação de base estatística, considerou-se que as áreas classificadas com suscetibilidade forte a muito forte são os valores positivos e as áreas classificadas como suscetibilidade média e fraca/nula são considerados valores negativos. Na modelação matemática de base física, considerou-se que, no Shalstab, para os valores de $\log Q/T < -2,5$ são considerados valores positivos e para $\log Q/T > -2,5$ são negativos. No caso do Sinmap, considerou-se o conjunto das classes *instável*, *limite inferior* e *superior* como valores positivos e o conjunto *quase estável*, *moderadamente estável* e *estável* como valores negativos.

O processo de validação foi aplicado ao conjunto dos cenários correspondentes aos vários modelos utilizados (Figura 14). Foi feita análise comparativa dos quatro cenários construídos a partir de dois modelos de base estatística: o valor informativo e a regressão logística recorrendo ao rácio dos verdadeiros positivos (TPR), ao rácio dos falsos positivos (FPR) e ao rácio da precisão (TPR/FPR).

Figura 14 – Validação com base na matriz de contingência de Kohavi e Provost (1998)

	Método Estatístico	TPR		FPR		Acc		PPV		TPR/FPR		F1=2((TPR*PPV)/(TPR+PPV))	
		MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m
Valor Informativo	Classificação com base na taxa de sucesso	0,779	0,638	0,159	0,127	0,841	0,873	0,00026	0,00027	4,906	5,008	0,000526	0,000536
	Classificação por quebras naturais	0,994	0,957	0,548	0,458	0,452	0,542	0,00010	0,00011	1,813	2,089	0,000195	0,000224
Regressão Logística	RL D8	0,80	0,67	0,32	0,31	0,68	0,69	0,00013	0,00012	2,495	2,184	0,000266	0,000233
	RL D=	0,83	0,60	0,28	0,22	0,72	0,78	0,00016	0,00015	3,030	2,729	0,000323	0,000294

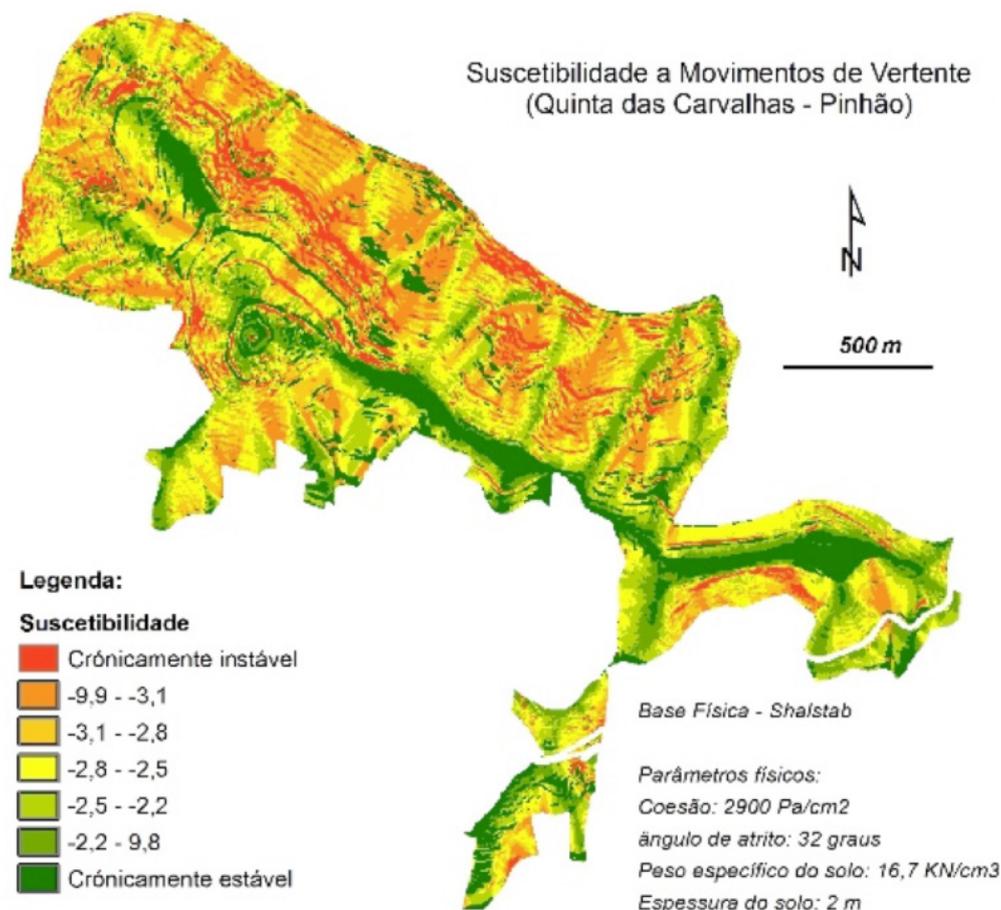
Método Matemático			TPR		FPR		Acc		PPV		TPR/FPR		F1=2((TPR*PPV)/(TPR+PPV))	
			MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m	MDE (A) resolução espacial de 5m	MDE (B) altim c/equidistância de 10m
Modelo SHALSTAB	Cenário 1	$c=2500 \text{ N/m}^2$; $Z=2\text{m}$; $p_s=16,7 \text{ kN/m}^2$; $\varphi=40^\circ$	0,5	0,475	0,185	0,200	0,815	0,800	0,00030	0,00026	2,698	2,376	0,000595569	0,000524467
	Cenário 2	$c=2600 \text{ N/m}^2$; $Z=1,5\text{m}$; $p_s=16,7 \text{ kN/m}^2$; $\varphi=40^\circ$	0,617	0,598	0,291	0,312	0,709	0,688	0,00023	0,00021	2,116	1,918	0,000467305	0,000423475
	Cenário 3	$c=2700 \text{ N/m}^2$; $Z=2\text{m}$; $p_s=16,7 \text{ kN/m}^2$; $\varphi=40^\circ$	0,666	0,644	0,346	0,371	0,654	0,629	0,00021	0,00019	1,921	1,734	0,000424211	0,000382914
	Cenário 4	$c=2700 \text{ N/m}^2$; $Z=1\text{m}$; $p_s=16,7 \text{ kN/m}^2$; $\varphi=40^\circ$	0,463	0,429	0,161	0,172	0,839	0,827	0,00032	0,00027	2,884	2,490	0,000636592	0,00054953
	Cenário 5	$c=2800 \text{ N/m}^2$; $Z=2\text{m}$; $p_s=16,7 \text{ kN/m}^2$; $\varphi=32^\circ$	0,837	0,846	0,574	0,607	0,427	0,393	0,00016	0,00015	1,458	1,394	0,000319939	0,000307933
Modelo SinMap	Cenário 1	T/R máxima 765,983; T/R mínima 189,216; c' máx 0,25; c' mín 0,245; p_s 1670 p_w 1000	0,49	0,61	0,26	0,31	0,74	0,69	0,00020	0,00021	1,886	1,944	0,000401472	0,000413927
	Cenário 2	T/R máxima 1348,974; T/R mínima 232,597; c' máx 0,26; c' mín 0,245; p_s 1670 p_w 1000	0,43	0,57	0,22	0,26	0,78	0,74	0,00020	0,00023	1,902	2,198	0,000404973	0,000468062
	Cenário 3	T/R máxima 1531,966; T/R mínima 378,432; c' máx 0,27; c' mín 0,245; p_s 1670 p_w 1000	0,31	0,41	0,15	0,14	0,85	0,86	0,00022	0,00031	2,054	2,883	0,000437119	0,000613496

A análise comparativa dos modelos de base estatística destacam-se o valor informativo, classificado com recurso aos intervalos naturais com $TPR = 0,99$ e a regressão logística com o $TPR = 0,84$. Contudo, o VI apresenta um TPR/FPR de 1,8 ao passo que a regressão logística tem um TPR/FPR de 3. Isto significa que a classificação correta da quase totalidade dos movimentos de vertente feita pelo VI com IN corresponde a um elevadíssimo alargamento da área classificada como positiva, o que não acontece com a RL com o melhor cenário. Neste caso a capacidade discriminante do VI é muito fraca não dando contributos significativos para a capacidade de gestão do risco associado à atividade vitivinícola. É um cenário muito prudente,

mas de fraco apoio à decisão. Nesse sentido, é pouco eficaz. Dos dois cenários, é mais útil à gestão do risco o recurso à RL. Embora evidencie lacunas ao nível dos parâmetros que foram utilizados, consegue uma boa relação entre a capacidade preditiva e a definição de diversos graus de suscetibilidade. Nesse sentido, é mais útil na discriminação espacial da suscetibilidade que sirva de suporte à decisão na gestão do risco relacionado com a atividade agrícola.

Do conjunto de cenários apresentados para os modelos matemáticos de base física obtivemos capacidades preditivas melhores para o Shalstab sendo que os dois melhores cenários são o 3 e o 5 com TPR de 0,67 e 0,83, respetivamente, ambos utilizando o MDE construído a partir das fotografias aéreas de elevada resolução. Desses dois, o cenário 5 (Figura 15) apresenta o melhor desempenho, resultante de atribuição de uma maior área aos valores superiores no processo de classificação da suscetibilidade. Esse fato resulta do valor atribuído à espessura do solo de 2 m, mais consentâneo com a espessura de solo mobilizado quando da construção dos patamares agrícolas.

Figura 15 – Modelo matemático de base física com melhor ajustamento na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente translativos nos taludes dos patamares agrícolas da quinta das Carvalhas



Nesse contexto, excetuando o cenário 5, a capacidade preditiva destes modelos é genericamente baixa, o que nos impõe uma análise sobre a variação dos parâmetros que condicionam a instabilidade. Para que a capacidade preditiva aumente é necessário que a

área definida como mais suscetível seja alargada, sem que isso se faça a expensas de classificação como instáveis de áreas que de fato apresentam fraca suscetibilidade. No caso da modelação com base nos modelos matemáticos de base física, só se pode melhorá-los com a revisão dos parâmetros físicos representativos das condições físicas do terreno. Esse efeito é considerado no cenário 5, onde se utilizaram os parâmetros medidos no terreno. O facto dos parâmetros que são utilizados para modelar a suscetibilidade não apresentarem variação espacial não constituem problema significativo dado que a modelação está a ser desenvolvida numa área geomorfologicamente uniforme (formação das Bateiras) exceto no que se refere à espessura do solo que poderá apresentar variação espacial. De uma forma geral identifica-se a espessura do solo com a espessura dos materiais mobilizados a quando da construção dos terraços agrícolas sendo aceitável que, num cenário mais prudente, a espessura dos materiais mais suscetíveis de se instabilizarem sejam próximas dos 2 m, em especial nas áreas mais declivosas. Esse é o principal motivo para que a capacidade preditiva do cenário 5 do Shalstab seja a mais elevada do conjunto dos cenários construídos na modelação matemática.

Questões finais

(a) A modelação da suscetibilidade a movimentos translativos em áreas com armação do terreno em terraços com talude de terra exige uma escala de análise muito pormenorizada. Grande parte dos parâmetros condicionantes comumente utilizados a escalas menores não apresentam variação espacial capaz de permitir análise estatística com o inventário. É o caso do uso do solo e da litologia. A uma grande escala, os fatores que originam a variação espacial da suscetibilidade estão mais fortemente relacionados com a morfologia do terreno e, no caso dos terraços agrícolas, com sua geometria e com a geomorfologia resultante da sua construção. A seleção dos parâmetros condicionantes, a par do conhecimento das técnicas construtivas dos patamares agrícolas, é essencial para a determinação dos modelos de instabilidade a adotar, tanto no plano dos métodos de base estatística como nos modelos matemáticos de base física.

(b) Um projeto de intervenção sobre o território com forte capacidade de alteração da geomorfologia do terreno, como é o caso da construção de patamares agrícolas, necessita de uma prévia avaliação das condições de suscetibilidade geomorfológica. Isso coloca um grande desafio no que se refere às metodologias a desenvolver. Como validar essa avaliação? Que critérios permitam transferir metodologias de outras áreas semelhantes para os projetos em análise?

(c) A modelação matemática de base física é uma metodologia de trabalho capaz de avaliar a instabilidade de vertentes independentemente do inventário de ocorrências. O desenvolvimento dessa avaliação em projetos de intervenção sobre terrenos onde não se pode usar inventário é um desafio à geomorfologia e à geografia física. O estudo dos processos hidrológicos e geomorfológicos em laboratório pode ser uma forma de antecipar potenciais problemas relativos à modelação da suscetibilidade geomorfológica em projeto antes da implementação no terreno.

Referências

- ALMEIDA, J. R. N. Vitivinicultura duriense. **Observatório** – Revista do Sector de Ação Cultural da Câmara Municipal de V. N. de Gaia, V. N. de Gaia, n. 1, p. 17-30, 1990.
- BATEIRA, C. et al. Movimentos de vertente no norte de Portugal: importância do comportamento hidrológico das formações superficiais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 4, p. 551-565, 2014.
- BATEIRA, C.; SOARES, L. Movimentos de massa no norte de Portugal: fatores da sua ocorrência. **Territorium**, n. 4, p. 63-77, 1997.
- FERREIRA, A. B. Planaltos e montanhas do norte da Beira: estudo de geomorfologia. **Memória do Centro de Estudos Geográficos**. Lisboa: CEG, 1978. n. 4.
- KOHAVI, R.; PROVOST, F. **Special Issue on Applications of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process**. Machine Learning, p. 271-274, 1998.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP. In: ANNUAL GIS CONFERENCE, 15. Vancouver, British Columbia, 2001, p. 19-22.
- PEREIRA, S. **Perigosidade a movimentos de vertente na região norte de Portugal**. Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 2009.
- PEREIRA, S. et al. Análise comparativa dos processos de escoamento desenvolvidos em terraços agrícolas de áreas com granitoides e metassedimentos. In: JORNADAS SOBRE TERRAZAS Y PREVENCIÓN DE RIESGOS NATURALES, 14-16 sept. 2006, Mallorca. **Actas...** Palma: Consell de Mallorca, 2007. p. 52-64.
- QUARESMA, I. **Inventariação e análise de eventos hidro-geomorfológicos com carácter danoso em Portugal Continental**. Lisboa: *Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa*, 2009.
- QUINN, P. et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 59-79, 1991.
- SANTOS, M. et al. Hydro-geomorphologic GIS database in Northern Portugal, between 1865 and 2010: Temporal and spatial analysis. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 10, part A, p. 143-152, 2014.
- SEIXAS, A. et al. Definição de critérios de susceptibilidade geomorfológica a movimentos de vertente na bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas (Bacia do Douro – Peso da Régua). In: JORNADAS SOBRE TERRAZAS Y PREVENCIÓN DE RIESGOS NATURALES, 14-16 sept. 2006, Mallorca. **Actas...** Palma: Consell de Mallorca, 2007. p. 94-104.

- SHARMA, S. Slope Stability Concepts. ABRAMSON, L. W. et al. (Ed.). **Slope Stability and Stabilization Methods**. New York: John Wiley & Sons, 2002. p 329-461.
- SOARES, L. **A importância das formações superficiais no âmbito dos processos de erosão hídrica e movimentos de vertente no NW de Portugal**. Dissertação (Doutoramento) – Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- SOUSA, M. B. **Litoestratigrafia e estrutura do CXG-Grupo do Douro**. Tese (Doutoramento) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 1982.
- TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.
- TEIXEIRA, M. et al. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. **Landslides**, May 2014.
- ZÊZERE, J. L. et al. Disaster: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. **Natural Hazards**, v. 72, n. 2, p. 503-532, 2014.