

AVALIAÇÃO DETERMINÍSTICA DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO NA VERTENTE SUL DE ODIVELAS

DETERMINISTIC LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY EVALUATION AT THE SOUTHERN HILLSLOPE OF ODIVELAS

Murtinha, Laura; *FCT-UNL; Portugal; Lisboa; l.murtinha@gmail.com*

Jorge, Celeste; *LNEC; Portugal; Lisboa; cjorge@lnec.pt*

Fernandes da Silva, Ana Paula; *FCT-UNL; Portugal; Lisboa; apfs@fct.unl.pt*

RESUMO

Neste trabalho ensaiam-se abordagens à avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno em contexto urbano, aplicadas ao caso específico da Vertente Sul de Odivelas. Este encontra-se no seguimento de um trabalho efectuado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil no âmbito de um estudo geológico e geotécnico para a consolidação da encosta da Vertente Sul de Odivelas e que contribuiu para a tomada de decisão da Câmara Municipal de Odivelas quanto ao futuro plano urbanístico. Deste modo procurou-se aplicar duas metodologias determinísticas, uma absoluta (metodologia do programa SHALSTAB) e outra com componente estocástica (adaptação da metodologia do programa SINMAP), que permitissem obter resultados por diversos métodos de natureza quantitativa das áreas susceptíveis a movimentos de terreno, mais especificamente, a escorregamentos translacionais superficiais.

ABSTRACT

This work aims to provide different approaches to landslide susceptibility assessment in an urban context, more specifically the Southern hillside of Odivelas (Vertente Sul de Odivelas). It follows a work initiated by the Nacional Laboratory of Civil Engineering (LNEC) that was aimed at providing a geological and geotechnical study for slope consolidation at the Southern hillside of Odivelas and has contributed to the renewed local urbanisation plan. Two deterministic approaches to determine landslide susceptibility (more specifically shallow translational landslides) were considered, in order to obtain different quantitative results. The first approach is based on the SHALSTAB program methodology and the second, which differs from the first by containing a stochastic component, is an adaptation of the SINMAP program methodology.

1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho, realizado no âmbito da dissertação de mestrado de Murtinha (2014), teve por objectivo a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno por métodos determinísticos na faixa Sul do concelho de Odivelas, denominada Vertente Sul de Odivelas. Este encontra-se no seguimento de um trabalho efectuado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no âmbito de um estudo geológico e geotécnico para a consolidação da encosta da Vertente Sul de Odivelas pois esta apresenta características que, a diversos níveis, podem contribuir para a desestabilização da vertente e, conseqüentemente, constituir uma situação de perigo para pessoas e bens.

Os deslizamentos são o principal interveniente no processo de evolução das vertentes nas costeiras do concelho de Odivelas, sendo iniciados pela acção da precipitação e agravados com as intervenções antrópicas sucessivas aos cursos naturais das linhas de água e abertura de taludes (CMO, 2009; Zêzere *et al.*, 2005; Piedade *et al.*, 2011).

De acordo com o último relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013; IPCC, 2014a; IPCC, 2014b), o aquecimento do clima é inequívoco e muitos riscos globais inerentes às alterações climáticas encontram-se concentrados em áreas urbanas. A modificação dos padrões de precipitação altera o teor de humidade do solo, promovendo uma maior desestabilização das vertentes. Assim, no estudo de factores de risco naturais, deve-se ter em conta o aumento de eventos extremos, nomeadamente precipitações intensas, que impõem sérios riscos às pessoas, economias e ecossistemas em contexto urbano.

Segundo o Plano Municipal de Emergência de Odivelas, os movimentos de massa (neste trabalho movimentos de terreno) têm carácter de gravidade acentuada, uma probabilidade de ocorrência média-alta e apresentam um risco elevado, pelo que se torna imperativo um estudo exaustivo das condições de instabilização nas vertentes do concelho, nomeadamente na Vertente Sul de Odivelas considerada como uma das "zonas de duvidosa segurança geotécnica" (CMO, 2009).

A Vertente Sul de Odivelas compreende uma área com cerca de 160 hectares, contida entre a Circular Regional Interna de Lisboa (CRIL/IC17), contígua ao Rio da Costa, e o limite do concelho de Lisboa. Esta é caracterizada por uma topografia acidentada, com declive acentuado, e por uma ocupação urbana de génese ilegal. A ocupação urbana inclui os bairros Vale do Forno, Encosta da Luz, Quinta do José Luís, Serra da Luz e a Quinta das Arrombas.

Os bairros incluídos na Vertente Sul de Odivelas são Áreas Urbanas de Génese Ilegal (AUGI) e no seu conjunto constituem-se como Área Crítica de Recuperação e Reversão Urbanística (ACCRU), declarada pela publicação do Decreto n.º 3/2008 de 31 de Janeiro, publicado em Diário da República 1.ª Série – n.º 22 de 31 de Janeiro de 2008. De acordo com o Plano Director Municipal de Odivelas (CMO, 2009), as áreas que combinam litologias menos competentes do ponto de vista geotécnico, aliadas a declives bastante acentuados, conduzem a situações preocupantes de instabilidade do terreno, especialmente aquando da existência de edificação clandestina. Assim, as condições naturais do terreno, e pelo perigo que apresentam ao nível da segurança de pessoas e bens, "são condicionadoras de futuras ocupações e da manutenção das ocupações ali existentes, devendo ser traduzidas em normas de actuação, em sede de regulamento".

2 - ÁREA DE ESTUDO

A zona em estudo localiza-se no Concelho de Odivelas, pertencente ao Distrito de Lisboa, e abrange a área delimitada a Norte pela IC17/CRIL e a Sul pelo limite entre os concelhos de Odivelas e Lisboa (Figura 1). Nesta região, a geomorfologia é caracterizada pelo relevo em costeira, orientada de NE-SW. Nesta costeira insere-se a área de estudo, denominada Vertente Sul do Concelho de Odivelas, virada a N-NW e que se prolonga por cerca de 10 km desde a Calçada de Carriche/Senhor Roubado até à Pontinha. O processo de evolução nesta região tem como principal interveniente os movimentos de massa.



Figura 1 – Zona de estudo e respectivos bairros da Vertente Sul de Odivelas (adaptado de Andrade *et al.*, 2012)

A costeira de Odivelas-Vialonga está talhada nas séries sedimentares datadas do Eocénico-Oligocénico e do Miocénico, que representam a unidade lito-estratigráfica designada por Formação de Benfica (Φ) e a Série Miocénica da região de Lisboa (M). Estas séries apresentam alternâncias de rochas com dureza, permeabilidade e plasticidade muito distintas (e.g. conglomerados bem consolidados, margas, argilas, arenitos, etc.) dispostos em estrutura monoclinal com pendores para S e SE em direcção ao estuário do Tejo. A nível da hidrogeologia, a Formação de Benfica é caracterizada por materiais pouco permeáveis (argilo-siltosos), com intercalações areno-siltosas mais permeáveis. O conjunto é pouco permeável verticalmente, verificando-se uma maior permeabilidade horizontal. Deste cenário podem resultar diversos níveis aquíferos suspensos, pouco contínuos, mas com interferência na estabilidade local (Jorge e Ramos, 2012).

Na área em estudo, a distribuição inter-anual da precipitação é bastante irregular podendo ocorrer longos períodos de precipitação intensa, geralmente durante as estações chuvosas que se estendem de Outubro a Março, alternados com períodos mais secos. Pontualmente ocorrem eventos de precipitação muito intensa que provocam cheias nas zonas mais baixas. Jorge e Ramos (2012) e Sousa (2013) referem que nos últimos 12 anos tem-se vindo a verificar um aumento da precipitação mensal devido a alterações climáticas, com incidência muito significativa nos meses de outubro e novembro. Na área em estudo, os movimentos de terreno são maioritariamente induzidos pela precipitação e registam-se dois tipos de actividade de instabilidades de vertente: escorregamentos translacionais superficiais associados a episódios de precipitação curta e intensa – 1 a 15 dias, e escorregamentos profundos do tipo rotacional, translacional e complexo, associados a episódios de precipitação constante prolongada – 1 a 3 meses (Zêzere *et al.*, 2005; Piedade *et al.*, 2011).

A região da margem norte da área metropolitana de Lisboa é uma das mais afectadas, a nível nacional, por eventos hidro-geomorfológicos com efeitos danosos no período 1900-2008 (Quaresma e Zêzere, 2011). De acordo com Zêzere *et al.* (2005), o tipo de movimento mais frequente na região que engloba a área em estudo é o escorregamento translacional superficial. Este caracteriza-se por um movimento de massa exibindo uma superfície de rotura planar e com dimensão geralmente pequena. Na maioria dos casos, os movimentos superficiais ocorrem em taludes de elevada inclinação e afectam depósitos de coluvião.

3 - MODELOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE

Atendendo às características da área estudada, neste trabalho propôs-se efectuar a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno do tipo translacional superficial. Para esta classe de escorregamentos, é comum usar o modelo de estabilidade de talude infinito e, para o presente estudo, ainda foi introduzido um modelo hidrológico de regime permanente.

De modo a quantificar os potenciais escorregamentos translacionais, foram escolhidos dois modelos determinísticos usados nos programas SINMAP - *Stability Index Mapping* (Pack *et al.*, 1998; Pack *et al.*, 2005) e SHALSTAB - *Shallow Landsliding Stability Model* (Dietrich e Montgomery, 1998). Estes modelos analisam áreas susceptíveis a instabilidades de vertente com base em dados de Modelos Digitais de Terreno (MDT) para o cálculo de um índice de estabilidade – output do modelo SINMAP - ou da recarga efectiva crítica necessária para induzir a rotura em cada célula – output do modelo SHALSTAB.

Estes modelos foram adoptados devido à relativa facilidade de obtenção dos dados de entrada necessários para o processamento e por se adequarem ao estudo em curso, uma vez que neste trabalho se pretendeu avaliar quantitativamente a susceptibilidade a escorregamentos translacionais superficiais pois este tipo de movimento ocorre com maior frequência na região estudada (Zêzere *et al.*, 2005; Piedade *et al.*, 2011). Ambos utilizam modelos numéricos e pressupostos hidrológicos de regime permanente similares para a quantificação da influência da topografia na pressão intersticial (Witt, 2005).

3.1 - Introdução teórica

Selby (1993) propôs uma reformulação para a aplicação do critério de rotura de Mohr-Coulomb a taludes infinitos, em que é desprezada a influência dos extremos no talude estudado, considerando que o comprimento da vertente é substancialmente maior que a espessura do solo, supondo-se assim infinito perante esta. Assim, é possível obter um índice de estabilidade adimensional, ou seja, o Factor de Segurança (FS) do modelo de estabilidade de talude infinito, comparando os componentes desestabilizadores com os componentes estabilizadores. A equação desenvolvida a partir da reformulação proposta por Selby (1993) é comumente aplicada na modelação de estabilidade de taludes em ambientes SIG (Witt, 2005).

O modelo hidrológico de regime permanente que foi utilizado neste trabalho baseia-se nos trabalhos de Beven e Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986). O modelo assume um regime permanente de recarga que simula o padrão de variação espacial da espessura de solo saturado. A Figura 2 esquematiza este modelo, onde q é a recarga efectiva [$m \cdot dia^{-1}$] (i.e. precipitação menos evapotranspiração), a representa a área de contribuição a montante [m^2], b é a largura da unidade de terreno [m] (i.e. o comprimento da fronteira inferior de cada área de contribuição), θ é o declive da vertente [$^\circ$], z é a profundidade do solo [m] e h é a altura de solo saturado [m].

O'Loughlin (1986) define "humidade" (w), em inglês *wetness*, como a parcela saturada do solo num dado regime permanente de recarga. Desta forma, o nível de saturação do solo é obtido através da relação entre a água que entra no sistema sob forma de recarga permanente e a água que percola através da camada saturada do solo (Michel *et al.*, 2012). A equação 1 representa a formulação final do modelo hidrológico de regime permanente.

$$w = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin\theta} = \frac{h}{z} \quad [1]$$

$$T = k_s \cdot z \cdot \cos\theta$$

onde w é a humidade do solo [$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$], T é a transmissividade do solo [$\text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$] e k_s é a condutividade hidráulica do solo saturada [$\text{m} \cdot \text{dia}^{-1}$].

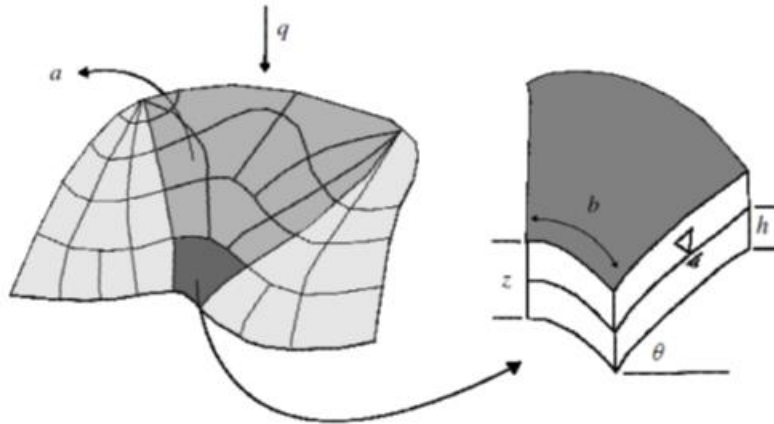


Figura 2 – Esquema ilustrativo do modelo hidrológico de regime permanente (Michel *et al.*, 2012)

Beven e Kirkby (1979) desenvolveram o parâmetro de área de contribuição específica A [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$], definido como a área de contribuição por unidade de comprimento da fronteira inferior da mesma. Este parâmetro foi desenvolvido na sequência de observações *in situ* que comprovam que maiores valores de teor em água, ou maiores áreas de saturação superficial, tendem a ocorrer em zonas depressivas convergentes. Também foi reportado que os movimentos de terreno ocorrem com maior frequência naquelas áreas de convergência topográfica (Montgomery e Dietrich, 1994).

Com base num modelo hidrológico com recurso ao índice de humidade, tem-se que a capacidade para haver fluxo lateral em cada ponto é obtido por $T \cdot \sin\theta$, assumindo uma condutividade uniforme na camada sobrejacente à barreira impermeável. Deste modo, obtém-se a “humidade relativa”, na equação 2, que define a profundidade do nível freático ena camada de solo estudada e que apresenta um limite superior à unidade pois qualquer excesso de teor em água é considerado como fluxo superficial indicando saturação da área (Pack *et al.*, 2005; Damacena *et al.*, 2010):

$$w = \min\left(\frac{q \cdot a}{T \cdot \sin\theta}, 1\right) \quad [2]$$

3.2 - Modelos utilizados

Para uma avaliação determinística absoluta foi adoptado o modelo SHALSTAB que calcula a recarga efectiva crítica (q_{cr}), ou seja, a recarga efectiva necessária para que ocorra instabilidade em determinada área.

$$q_{cr} = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} T \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) \frac{b}{a} \sin\theta \quad [3]$$

onde γ_h é o peso volúmico húmido do solo [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$], γ_w é o peso volúmico da água [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$] e φ é o ângulo de atrito interno do solo [$^\circ$].

O índice de estabilidade deste modelo é portanto expresso em função da recarga efectiva crítica e é variável numa escala onde valores maiores são indicativos de maior propensão à estabilidade (Zizioli *et al.*, 2013). Esta escala também dá a indicação de zonas de condição extrema de estabilidade. A primeira define que qualquer declive superior ou igual ao ângulo de atrito do solo inibe a capacidade do parâmetro de resistência do solo ($\tan\varphi$) de compensar o elevado declive da encosta, tornando assim a zona incondicionalmente instável, mesmo em condições de recarga nula. Por outro lado, se h/z exceder ou igualar o valor unitário, em que a camada de solo se encontra totalmente saturada, então a relação entre os parâmetros de resistência do solo é superior ao valor do declive e a zona é tida como incondicionalmente estável. Estas condições extremas de estabilidade são independentes de parâmetros hidrológicos pois, em situação de instabilidade incondicional, o factor decisivo é o valor da tangente do declive ser superior ou igual ao valor da tangente do ângulo de atrito. Por outro lado, para condições de

estabilidade incondicional, os declives suaves não permitem condições de instabilidade, mesmo em condições de saturação total (Witt, 2005).

A análise determinística com componente estocástica foi efectuada com recurso ao modelo SINMAP e tem como output um índice de estabilidade (SI) (Pack *et al.*, 1998). Este classifica a estabilidade do terreno com base na variação espacial do declive, da área de contribuição e de outros parâmetros hidrológicos e geotécnicos. Estes parâmetros possuem incertezas associadas, tanto em relação aos métodos subjacentes à sua determinação, como à respectiva variabilidade espacial e à necessidade de uniformização dos próprios valores (Michel *et al.*, 2012).

Assim, com base na incerteza associada aos parâmetros de entrada e nos seus limites superiores e inferiores, é calculado o índice de estabilidade SI, que se define como a probabilidade de uma área ser estável assumindo para alguns parâmetros (i.e. coesão, relação hidrológica (q/T) e ângulo de atrito) uma distribuição uniforme nos seus respectivos intervalos de incerteza. O valor de SI varia de 0 (mais instável) a 1 (menos instável). Quando os parâmetros mais conservativos (desestabilizadores) resultam, ainda assim, em estabilidade, o SI é definido como o Factor de Segurança (FS) dessa célula. Isto é verdade para valores de SI superiores à unidade.

$$FS = \frac{\cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin\theta}, 1\right) \frac{\gamma_w}{\gamma_h} \right] \tan\phi}{\sin\theta} \quad [4]$$

As variáveis a , b e θ provêm da topografia e na análise são acrescentados os parâmetros $\tan\phi$, γ_w/γ_h e q/T . Nesta análise, a relação dos pesos volúmicos é tida como constante no seu valor médio. Os outros parâmetros, $\tan\phi$ e q/T , estão associados a uma incerteza, logo, o modelo trabalha em termos de limites máximos e mínimos para estes parâmetros de acordo com uma distribuição uniforme.

Assim, o menor valor de $\tan\phi$, combinado com o maior valor de q/T , constitui o pior cenário, ou seja o mais conservador, dentro das condições estabelecidas e assumindo a variabilidade dos parâmetros de entrada. As áreas definidas sob este pior cenário, e que obtenham um FS superior à unidade, são tidas como incondicionalmente estáveis (Pack *et al.*, 2005). Da mesma forma, para o maior valor de $\tan\phi$, combinado com o menor valor de q/T , as áreas que obtenham um FS inferior a 1 são tidas como incondicionalmente instáveis. A classe de estabilidade das restantes zonas é fornecida através da equação 4.

Os modelos SHALSTAB e SINMAP partilham as mesmas suposições teóricas essenciais, ou seja, assume-se um paralelismo entre o plano de rotura e o nível freático, a espessura do solo e a condutividade hidráulica são uniformes em toda a extensão da zona estudada, os movimentos de terreno são do tipo translacional, o regime hidrológico é do tipo permanente e há ausência de drenagem profunda e fluxo no substrato (Zizioli *et al.*, 2013).

Estes modelos contemplam três termos topográficos, definidos pelo MDT: a área de contribuição a , o comprimento de contorno da fronteira inferior de cada área de contribuição b e o declive θ . Existem assim quatro parâmetros que necessitam de ser definidos para a aplicação do modelo: o peso volúmico húmido do solo γ_h , o ângulo de atrito ϕ , a transmissividade do solo T e a recarga efetiva q (Dietrich *et al.*, 2001).

3.3 - Parametrização dos modelos

Neste trabalho foi utilizado um MDT com células de 5×5 metros da área de estudo, fornecido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). A partir destes dados, foi possível calcular as áreas de contribuição a e os respetivos comprimentos dos trechos de descarga b . Os valores referentes ao ângulo de atrito e ao peso volúmico do solo foram obtidos por Sousa (2013), $\phi = 22,0$ e $33,7^\circ$ e $\gamma_h = 19,7$ e $22,7 \text{ kN.m}^{-3}$, e pela empresa Tecnasol (2002) *apud* Sousa (2013), $\phi = 28,0$ a $32,0^\circ$ e $\gamma_h = 19,0$ a $21,0 \text{ kN.m}^{-3}$.

Não foi possível efetuar o cálculo do valor da transmissividade a partir da condutividade hidráulica e da espessura da camada pois esta era desconhecida. Assim, o valor da transmissividade foi calculado a partir das formulações propostas em Simões (1998) e foi obtido através do caudal específico da camada em estudo. Segundo o relatório da Reserva Ecológica Nacional da Área Metropolitana de Lisboa (REN-AML, 2010), o caudal específico na zona em estudo adquire valores compreendidos entre $0,1$ e $0,5 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Desta forma, o valor de transmissividade médio considerado foi de $25 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$, ou seja, cerca de $2,90 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

No trabalho de Zêzere *et al.* (2005), estão reunidos os dados de precipitação associados a movimentos de terreno superficiais para a região situada a Norte de Lisboa, no período de 1956 a 2001. É possível verificar que na região em estudo há registo de precipitações máximas diárias superiores a 100 mm (i.e.

137 mm em 1967 e 164 mm em 1983). Assim, neste estudo foram considerados valores de recarga efetiva que abrangessem a gama de valores de precipitação máxima diária já registados para essa área. Os cálculos de instabilidade foram então efetuados para valores de q iguais a 10, 20, 50, 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹.

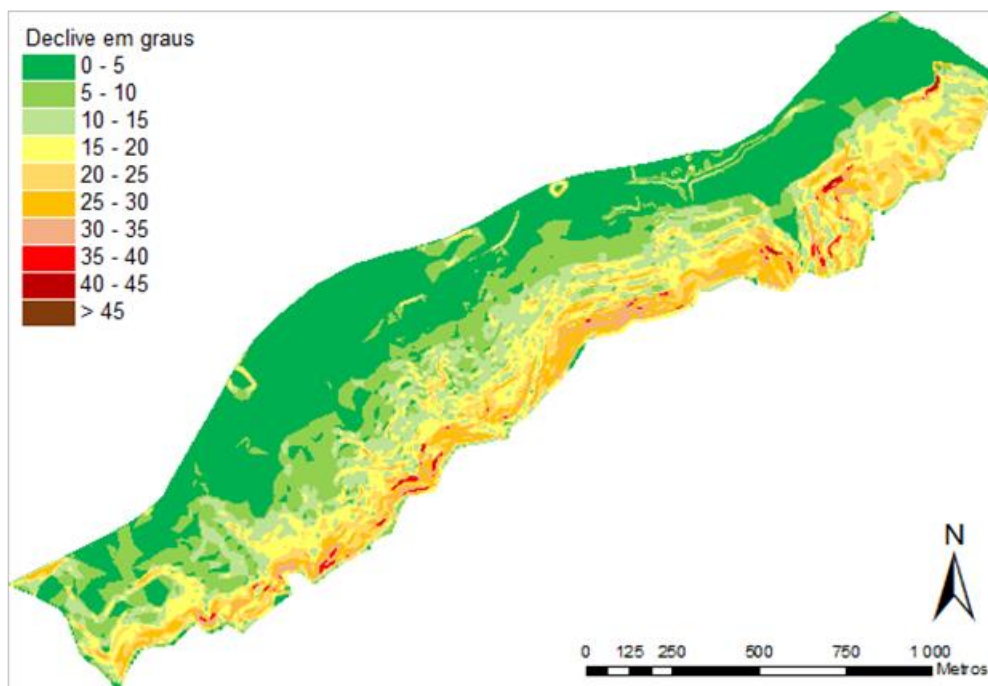


Figura 3 – Mapa do declive da área em estudo

4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De seguida são apresentados os resultados mais relevantes da aplicação das duas metodologias adoptadas: determinística absoluta e determinística com componente estocástica. Ao todo foram considerados 21 cenários, 17 utilizando a metodologia determinística absoluta e 4 a metodologia determinística com componente estocástica, para os quais foram variados os parâmetros definidos anteriormente de peso volúmico húmido, ângulo de atrito interno, transmissividade e recarga efectiva.

4.1 - Análise determinística absoluta

De seguida são apresentados os mapas e os valores referentes aos cenários 1, 16 e 17, obtidos através da aplicação da metodologia determinística absoluta (Figura 4). Estes cenários possuem uma combinação de características que representam, em termos de estabilidade, os cenários médio – cenário 1 ($\varphi = 30,0^\circ$, $\gamma_h = 20,0 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T=25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$), melhor – cenário 16 ($\varphi = 22,7^\circ$, $\gamma_h = 33,7 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T=25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$) e pior – cenário 17 ($\varphi = 19,7^\circ$, $\gamma_h = 22,0 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T=25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$), respectivamente.

Na avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno por modelação determinística absoluta, foram efectuados dois tipos de cálculos distintos para vários cenários. Em primeiro lugar foi calculada, para cada cenário, a estabilidade do terreno de acordo com o output definido pelo método SHALSTAB – $\log(q/T)$ e depois, a recarga efectiva crítica para que ocorra rotura em cada célula.

Considerando os 17 cenários, a área de estudo apresenta-se como incondicionalmente estável em cerca de 59,0 a 83,2% do território. Esta concentra-se nas zonas menos declivosas, ao longo do limite Norte desse território. No extremo oposto, tem-se as zonas tidas como incondicionalmente instáveis, cuja estabilidade depende apenas da relação entre o declive e o ângulo de resistência ao corte do solo, que ocupam entre 0,9 e 14,4% desse território.

Estas concentram-se sobretudo no limite Sul da área de estudo e no centro desta, ou seja, onde se localizam os bairros da Vertente Sul de Odivelas. As zonas onde a estabilidade é regida pela precipitação encontram-se nos extremos nascente e poente do território em análise (zonas mais próximas de Senhor Roubado e do bairro Menino de Deus) e, em termos de estabilidade, variam sobretudo entre a instabilidade elevada e a instabilidade moderada.

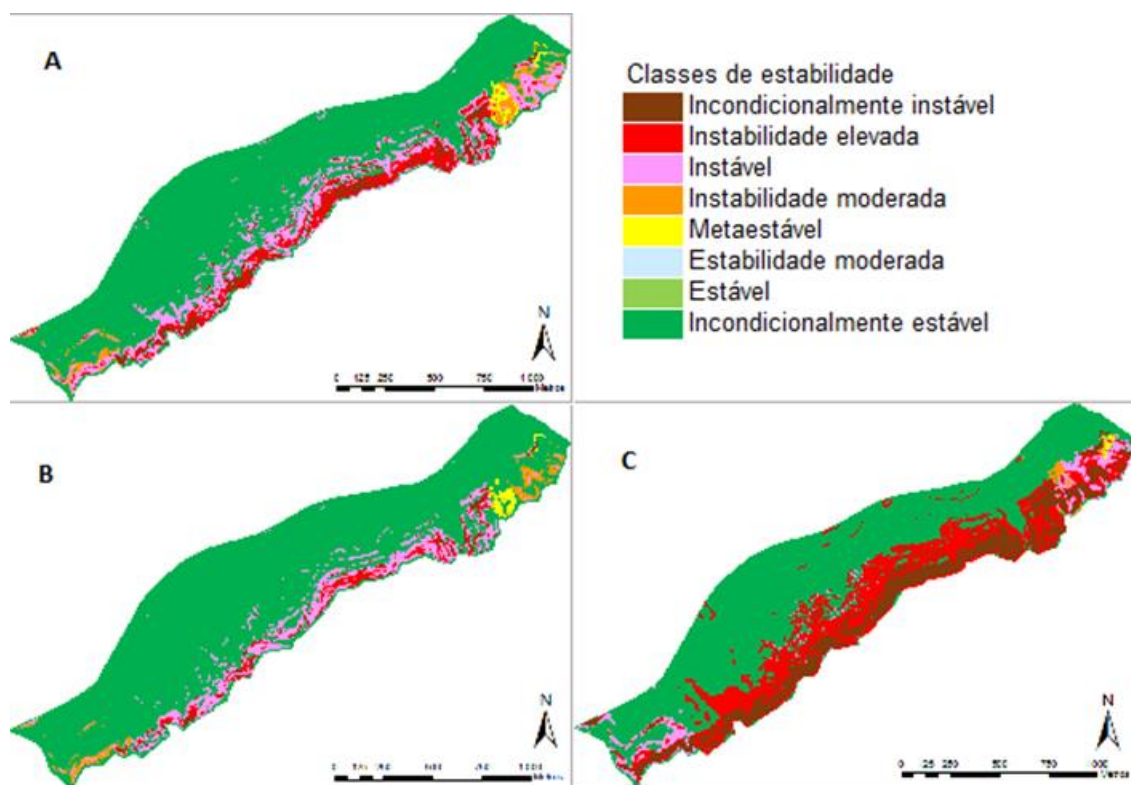


Figura 4 – Mapas com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para os cenários 1 (A), 16 (B) e 17 (C)

4.2 - Análise determinística com componente estocástica

Na avaliação da susceptibilidade pela técnica determinística com componente estocástica, os valores de transmissividade e ângulo de atrito do solo foram variados em cada célula segundo uma distribuição de probabilidade uniforme, como sugerido por Gorsevski *et al.* (2006). O valor de transmissividade, inicialmente de $25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$, foi variado em 20 e 40%, e o ângulo de atrito foi, por sua vez, variado entre os dados obtidos pela Tecnasol (2002, apud Sousa, 2013) e os obtidos por Sousa (2013).

Da combinação destes parâmetros obtiveram-se assim quatro cenários: 18 ($\varphi = [28,0-32,0]^\circ$, $\gamma_h = 20,0 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T = [20-30] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$), 19 ($\varphi = [28,0-32,0]^\circ$, $\gamma_h = 20,0 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T = [15-35] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$), 20 ($\varphi = [22,0-33,7]^\circ$, $\gamma_h = 20,0 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T = [20-30] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$) e 21 ($\varphi = [22,0-33,7]^\circ$, $\gamma_h = 20,0 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T = [15-35]$). Na figura 5 são apresentados os diferentes resultados obtidos na modelação do cenário 18 para valores de recarga efectiva de 10, 20 e $50 \text{ mm}.\text{dia}^{-1}$.

De acordo com esta técnica, obtiveram-se valores de estabilidade incondicional a variar entre 59,4 e 87,6% da área de estudo. Como referido anteriormente, estas zonas mais estáveis encontram-se na zona Norte da área de estudo. As áreas ditas como incondicionalmente instáveis, à semelhança do obtido para a outra abordagem, também se concentram no limite Sul e na parte mais central da Vertente Sul de Odivelas. Estas variam entre 8,3 e 24,0% da área de estudo. No entanto, estes valores estão muito condicionados aos critérios adoptados pelo especialista pois, nesta metodologia, as áreas consideradas como "incondicionais" dependem da recarga efectiva no terreno estando assim sujeitas a diversas interpretações.

4.3 - Comparação entre os métodos

A análise de sensibilidade contempla os resultados dos mapas de recarga efectiva crítica uma vez que partilham a mesma base de modelação para todos os cenários considerados. Assim, tal como na avaliação determinística absoluta da susceptibilidade aos movimentos de terreno, também se procedeu ao cálculo da recarga efectiva crítica na modelação determinística com componente estocástica.

Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados referentes às seis classes de recarga efectiva crítica, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, para os cenários de avaliação determinística absoluta (cenários 1, 16 e 17) e determinística com componente estocástica (cenários 18 a 21), contemplados na apresentação de resultados. Os limites das seis classes apresentadas coincidem com os limites da estabilidade em função de $\log(q/T)$ para um valor de T de $25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$.

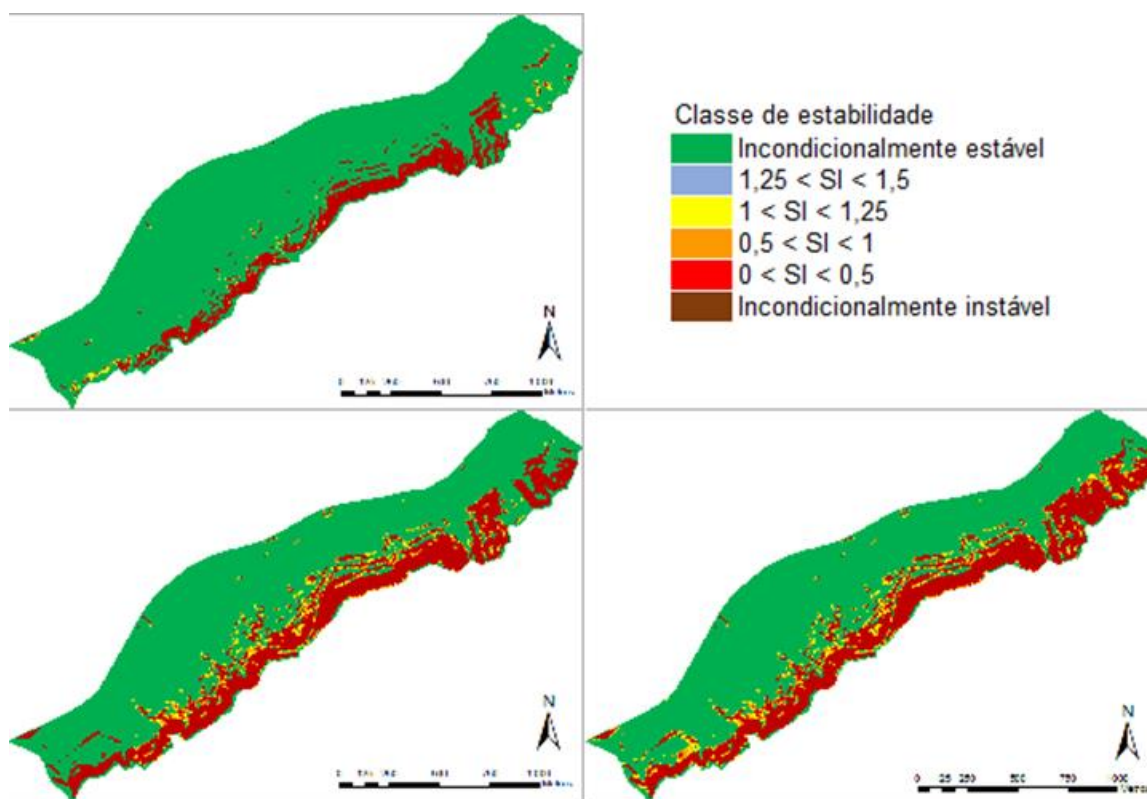


Figura 5 – Mapas com as classes de estabilidade SI para o cenário 18 em função $q = 10, 20$ e 50 mm.dia^{-1}

Nos cenários referentes à avaliação determinística absoluta (cenários 1, 16 e 17) obtiveram-se resultados bastante diversificados. No cenário 1 (cenário com valores médios), a classe com maior predominância é a correspondente a um valor de recarga efectiva crítica situado entre 20 e 40 mm.dia^{-1} . Esta classe abrange cerca de 13,2% da área estudada e é seguida pela classe 1 (com um valor de recarga efectiva crítica inferior a 10 mm.dia^{-1}) que abrange 8,0% da área. No cenário 16 (cenário optimista), a classe com maior predominância também é a 2, que contém um valor de recarga efectiva crítica situado entre 10 e 20 mm.dia^{-1} , no entanto, tem menor expressão que a do cenário 1 (9,6% da área de estudo) destacando-se das restantes classes. O cenário 17 é o mais conservador dos que foram produzidos pela avaliação determinística absoluta. Aqui, a classe mais relevante, é a 1, que contém um valor de recarga efectiva crítica inferior a 10 mm.dia^{-1} . Nesta classe registam-se 335 250 metros quadrados de terreno que correspondem a 21,6% da área de estudo. A classe a que corresponde a segunda maior área é a 2, com um valor de recarga efectiva crítica entre 10 e 20 mm.dia^{-1} , com 66 325 metros quadrados e 4,3% da área de estudo.

Quadro 1 – Resultados referentes às classes de racarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}), em metros quadrados e percentagem da área total, nos cenários 1, 16 e 17

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%
(1) $0 < q_{\text{crit}} < 10$	123 450	8.0	51 850	3.3	335 250	21.6
(2) $10 < q_{\text{crit}} < 20$	204 375	13.2	148 600	9.6	66 325	4.3
(3) $20 < q_{\text{crit}} < 40$	39 400	2.5	33 675	2.2	10 025	0.6
(4) $40 < q_{\text{crit}} < 79$	12 800	0.8	12 725	0.8	2 675	0.2
(5) $79 < q_{\text{crit}} < 158$	0	0.0	325	0.0	0	0.0
(6) $q_{\text{crit}} > 158$	0	0.0	0	0.0	0	0.0

Quadro 2 – Resultados referentes às classes de recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}), em metros quadrados e percentagem da área total, nos cenários 18 a 21

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
(1) $0 < q_{\text{crit}} < 10$	136 250	8,8	156 775	10,1	187 375	12,1	199 675	12,9
(2) $10 < q_{\text{crit}} < 20$	192 950	12,4	170 175	11,0	171 825	11,1	155 850	10,0
(3) $20 < q_{\text{crit}} < 40$	37 525	2,4	39 800	2,6	26 350	1,7	30 200	1,9
(4) $40 < q_{\text{crit}} < 79$	11 100	0,7	10 750	0,7	8 225	0,5	7 900	0,5
(5) $79 < q_{\text{crit}} < 158$	75	0,0	375	0,0	75	0,0	225	0,0
(6) $q_{\text{crit}} > 158$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Os cenários relativos à avaliação determinística com componente estocástica revelaram que, para os cenários 18 a 19, a classe com maior predominância na área é a que corresponde a um valor de recarga efectiva crítica situado entre 10 e 20 mm.dia^{-1} (classe 2), seguida da classe com um valor de recarga efectiva crítica inferior a 10 mm.dia^{-1} (classe 1), muito à semelhança do cenário 1. Por seu lado, os cenários 20 e 21 apresentam maior área afectada para a classe com um valor de recarga efectiva crítico inferior a 10 mm.dia^{-1} . Isto deve-se ao facto de estes serem os cenários determinísticos com componente estocástica mais conservativos, sobretudo o cenário 21 pois é o que combina as gamas de valores mais amplas de ângulo de atrito (22° a $33,7^\circ$) e transmissividade (15 a 35 $\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$). Ao expandir a gama de valores da transmissividade, entre o cenário 18 ($T = 20$ a 30 $\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$) e o cenário 19 ($T = 15$ a 35 $\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$), verifica-se que há uma atenuação da heterogeneidade entre os valores de área das classes com valores de recarga efectiva crítica inferiores a 20 mm.dia^{-1} (classes 1 e 2). Ao comparar os cenários 18 ($\phi = 28^\circ$ a 32°) e 20 ($\phi = 22,0^\circ$ a $33,7^\circ$), que diferem pela gama de valores de ângulo de atrito, observa-se que aquelas mesmas duas classes são reforçadas em detrimento das classes que apresentam um valor de recarga efectivo crítico superior a 20 mm.dia^{-1} . Assim, no cenário 20, a probabilidade de iniciação de movimentos de terreno é maior, pois os valores de área são mais elevados para classes de valores de recarga efectiva que ocorrem com maior frequência.

Assim, considerando os 21 cenários, as áreas tidas como incondicionalmente estáveis variam entre 59,0 e 72,6% da área de estudo. As áreas tidas como incondicionalmente instáveis variam entre 0,9 e 14,4% da região, sendo que nos cenários com componente estocástica, estas variam entre 3,1 e 6,3%. Tal deve-se às características desta classe de estabilidade, que apenas têm em conta o valor do declive e do ângulo de resistência ao corte. Assim, como o cenário 16 (cenário menos conservador) tem um valor de ângulo de atrito de $33,7^\circ$ em todas as células, tem-se que o terreno é instável apenas para as células que apresentem um declive superior a $33,7^\circ$. Nos cenários 18 a 21, como o valor de ângulo de atrito segue uma distribuição uniforme entre 28 e 32° e entre $22,0$ e $33,7^\circ$, a proporção de áreas instáveis tende a fixar-se nas médias de cada conjunto de valores de ângulo de atrito, ou seja, $30,0^\circ$ e $27,9^\circ$.

5 - CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se uma avaliação quantitativa da susceptibilidade a movimentos de terreno na designada Vertente Sul de Odivelas. A zona estudada compreende uma área com cerca de 160 hectares, contida entre a Circular Regional Interna de Lisboa (CRIL/IC17), contígua ao Rio da Costa, e o limite do concelho de Lisboa. Esta é caracterizada por uma topografia acidentada, com declive acentuado, e por uma ocupação urbana de génese ilegal. A ocupação urbana inclui os bairros Vale do Forno, Encosta da Luz, Quinta do José Luís, Serra da Luz e a Quinta das Arrombas.

De acordo com Zêzere *et al.* (2005), o tipo de movimento mais frequente na região em estudo é o escorregamento translacional superficial, tipicamente associado a episódios de precipitação curta e intensa (1 a 15 dias). Devido a estas características do terreno, procedeu-se ao estudo da estabilidade com recurso às metodologias de dois freewares, SINMAP - Stability Index Mapping (Pack *et al.*, 1998; Pack *et al.*, 2005) e SHALSTAB - Shallow Landsliding Stability Model (Dietrich e Montgomery, 1998), especialmente desenvolvidos para o estudo deste tipo de escorregamentos. O estudo foi assim conduzido adoptando duas técnicas de análise distintas: modelação determinística absoluta (da metodologia SHALSTAB) e modelação determinística com componente estocástica (adaptada da metodologia SINMAP).

Assim, considerando os 21 cenários, as áreas tidas como incondicionalmente estáveis variam entre 59,0 e 72,6% da área de estudo. As áreas tidas como incondicionalmente instáveis variam entre 0,9 e 14,4% da região, sendo que nos cenários com componente estocástica, estas variam entre 3,1 e 6,3%. Tal deve-se às características desta classe de estabilidade, que apenas têm em conta o valor do declive e do

ângulo de resistência ao corte. Assim, como o cenário 16 (cenário menos conservador) tem um valor de ângulo de atrito de 33,7° em todas as células, tem-se que o terreno é instável apenas para as células que apresentem um declive superior a 33,7°. Nos cenários 18 a 21, como o valor de ângulo de atrito segue uma distribuição uniforme entre 28 e 32° e entre 22,0 e 33,7°, a proporção de áreas instáveis tende a fixar-se nas médias de cada conjunto de valores de ângulo de atrito, ou seja, 30,0° e 27,9°.

As áreas que não apresentaram estabilidade ou instabilidade incondicional, têm a sua estabilidade dependente da precipitação. Num cenário médio (cenário A), 8% da área de estudo torna-se instável para valores de recarga efectiva de 10 mm.dia⁻¹. Este valor aumenta para 21,2% do território para uma recarga efectiva de 20 mm.dia⁻¹, considerando que este valor abrange 86,3% da área tida como não incondicional, ou seja, cuja estabilidade depende da precipitação. Ao somar este valor às áreas já de si tidas como incondicionalmente instáveis, verifica-se que, para valores de recarga efectiva de 20 mm.dia⁻¹, 24% da área de estudo é instável.

Tendo em conta os registos de precipitação diária do Instituto D. Luíz na região de Lisboa desde 2001, pode-se verificar que episódios em que ocorram valores de precipitação superiores a 20 mm.dia⁻¹ não são incomuns. Desde Janeiro de 2001 a Agosto de 2014 registaram-se cerca de 164 ocorrências e que estas situam-se sobretudo entre os meses de Setembro/Outubro e Março/Abril, com prevalência nos meses de Outubro e Novembro.

Em termos dos bairros da Vertente Sul de Odivelas, foram analisados os elementos edificados mais expostos à instabilidade do terreno, com recurso aos dados do Censos 2011 (INE, 2011). De um modo geral, os bairros mais afectados pela instabilidade do terreno são os da Serra da Luz (78 edifícios e cerca de 600 residentes), da Encosta da Luz (26 edifícios e 105 residentes) e de Vale do Forno (cerca de 75 edifícios e 480 residentes), perfazendo um total de perto de 180 edifícios e 1180 pessoas afectadas.

Os resultados apresentados não utilizam parâmetros tais como o uso do solo, logo, sendo a Vertente Sul de Odivelas uma área urbanizada, esta contém inúmeras zonas impermeabilizadoras que não possibilitam a infiltração da recarga. Assim, os valores de recarga efectiva deste trabalho não correspondem aos valores de recarga que efectivamente se infiltra no solo.

REFERÊNCIAS

- Andrade, I., Figueiredo, C., Vieira, S. (2012). Diagnóstico Socio-económico da Vertente Sul de Odivelas. Centro de Estudos e Desenvolvimento Regional e Urbano. Câmara Municipal de Odivelas.
- Beven, K. e Kirkby, M. (1979). A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1): 43-69.
- CMO (2009). Plano Director Municipal de Odivelas, Vol4.1 – Caracterização do Território – Componentes Ambientais. Câmara Municipal de Odivelas.
- Damacena, F., Guimarães, R., Catão, R., Gomes, R., Barbosa, F., Júnior, O. (2010). Identificação de zonas de saturação na paisagem a partir de dados de transmissividade obtidos em campo na bacia hidrográfica do Rio Jardim (DF). *Espaço & Geografia*, 12(1): 105-123.
- Dietrich, W., Bellugi, D., Asua, R. (2001). Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for Forest Management. *Water Science and Application*, 2: 195-227.
- Dietrich, W. & Montgomery, D. (1998). SHALSTAB - A digital terrain model for mapping shallow landslide potential, <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>, acessado a 08/07/2014.
- Gorsevski, P., Gessler, P., Boll, J., Elliot, W., Foltz, R. (2006). Spatially and temporally distributed modelling of landslide susceptibility. *Geomorphology*, 80: 178-198.
- INE (2011). Censos 2011 – XV Recenseamento Geral da População e V Recenseamento Geral da Habitação. Instituto Nacional de Estatística. Visualizado a 07/10/2014 em <http://mapas.ine.pt/map.phtml>.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014a). Summary for Policymakers - Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014b). Summary for Policymakers - Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Jorge, C. & Ramos, R. (2012). Estudo geológico e geotécnico para a consolidação das encostas da Vertente Sul de Odivelas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Proc. 0504/1/18111.
- Michel, G., Kobiyama, M., Goerl, R. (2012). Análise comparativa entre os modelos SHALSTAB e SINMAP na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos.
- Montgomery, D. & Dietrich, W. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4): 1153-1171.
- Murtinha, L. (2014). Avaliação Determinística da Susceptibilidade a Movimentos de Terreno na Vertente Sul de Odivelas – Influência das Alterações Climáticas. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia).
- O'Loughlin, E. (1986). Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, 22(5): 794-804.
- Pack, R., Tarboton, D., Goodwin, C. (1998). SINMAP User's Manual – A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping. Utah State University.
- Pack, R., Tarboton, D., Goodwin, C., Prasad, A. (2005). SINMAP2 User's Manual – A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping. Utah State University.
- Piedade, A., Zêzere, J., Melo, R., Henriques, C., Pinto, P., Pereira, S. (2011). Avaliação e validação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos em diferentes contextos geomorfológicos em Portugal continental. RISKam, Centro de Estudos Geográficos. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Quaresma, I. & Zêzere, J. (2011). Cheias e movimentos de massa com carácter danoso em Portugal continental. RISKam, Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa.
- Selby, M. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. 2nd ed., Oxford University Press. 466p.
- Simões, M. (1998). Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do Cenozóico da Bacia do Baixo Tejo. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia.
- Sousa, F. (2013). Análise dos condicionamentos à construção numa encosta com instabilidades. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território.
- Witt, A. (2005). Using a GIS (Geographic Information System) to model slope instability and debris flow hazards in the French Broad River watershed, North Carolina. Thesis submitted for the degree of Master of Science in Marine, Earth and Atmospheric Sciences. Raleigh.
- Zêzere, J., Trigo, R., Trigo, I. (2005). Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 331-344.
- Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R., Montrasio, L. (2013). Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 559-573.