

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências da Terra

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

Influência das alterações climáticas

Por

Laura Catarina Sanches da Gama Moreno Murtinha

(Licenciada em Engenharia Geológica)

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientadora: Doutora Celeste R. Ramalho Jorge (LNEC)

Co-orientadora: Prof.^a Doutora Ana Paula Fernandes da Silva (FCT-UNL)

Lisboa

2014

Avaliação Determinística da Susceptibilidade a Movimentos de Terreno na Vertente Sul de Odivelas –
Influência das Alterações Climáticas

Copyright© Laura Catarina Sanches da Gama Moreno Murtinha, 2014

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família e à memória do meu avô

“The term ‘natural disaster’ has become an increasingly anachronistic misnomer. In reality, human behaviour transforms natural hazards into what should really be called unnatural disasters”.

Kofi Annan (1999)

Agradecimentos

Este trabalho teve o contributo de várias pessoas e instituições que, directa ou indirectamente, permitiram a realização desta dissertação e que sem as quais não seria possível a sua conclusão. Assim, de uma forma muito especial expresso os meus agradecimentos:

À Doutora Celeste Jorge pela orientação, amizade e constante boa disposição. Pela disponibilidade sempre demonstrada, por vezes mesmo sem a ter, e por todas as sugestões e correcções que muito valorizaram o meu trabalho, bem como pelo fornecimento de documentação fundamental, conhecimentos e motivação necessária ao desenvolvimento do mesmo. É com grande admiração e consideração que lhe agradeço por tudo.

À Professora Ana Paula Silva pela orientação e amizade, bem como pelo fornecimento de documentação, revisão e crítica deste trabalho.

Ao Professor Paulo Caetano e à Professora Graça Brito pelas palavras de incentivo que foram demonstrando ao longo do meu percurso académico.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, na pessoa da Doutora Laura Caldeira, Directora do Departamento de Geotecnia, e do Doutor Filipe Telmo Jeremias, Chefe do Núcleo de Geologia de Engenharia e Ambiente, por me terem recebido nas instalações de modo que pudesse realizar o trabalho.

À Doutora Rute Ramos agradeço a cedência de dados georreferenciados da área de estudo e a sua opinião fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

À Câmara Municipal de Odivelas e ao Departamento de Urbanismo pela permissão de utilização dos dados.

Aos meus pais por sempre me terem apoiado incondicionalmente e pelo orgulho sentido. A vós vos devo quem sou.

Ao meu irmão Duarte, avós Raquel, Emília e António, e tios Paz e Gustavo, pelo apoio e incentivo constante ao longo do meu percurso académico.

Ao Bruno por ser quem é, pela eterna paciência e apoio demonstrados ao longo do desenvolvimento do trabalho e por sempre ter sido a voz de consolo e esperança nos momentos mais difíceis. A ti devolvo as palavras que um dia me disseste “que juntos consigamos escrever uma bonita história”.

Aos amigos e colegas de faculdade, Bruno Silva o meu “companheiro de guerra”, Ricardo Manuel, Henrique Lopes, Catarina Vicente, Rita Gomes, Inês Bento, João Brissos, obrigada por estes anos de amizade e companheirismo, pelas longas horas de conversa, por tudo.

Aos meus gatos, Serafim Saudade e Sidónio Pais, pela companhia silenciosa durante as longas horas de modelação.

A todos aqueles que não foram aqui mencionados, mas cujo contributo também foi essencial.

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. Esta dissertação 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. A encosta, com cerca de 160 hectares, compreende os bairros de Vale do Forno, Encosta da Luz, Quinta do José Luís e Serra da Luz e a localidade Quinta das Arrombas. Estes bairros pertencem a unidades denominadas Áreas Urbanas de Génese Ilegal e apresentam características que, a diversos níveis, podem contribuir para a desestabilização da vertente e, conseqüentemente, constituir uma situação de perigo para pessoas e bens.

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. Os modelos de base física utilizados permitem a determinação quantitativa da estabilidade das vertentes pela aplicação de métodos de equilíbrio limite, nomeadamente de talude infinito, que simulam os mecanismos físicos que controlam a ocorrência de movimentos de terreno. Para a aplicação destes modelos a informação necessária inclui: as características geotécnicas e hidrogeológicas do terreno (peso volúmico, ângulo de atrito interno e transmissividade do solo) obtidas por consulta bibliográfica e debate com especialistas; o declive, produzido a partir de um modelo digital de terreno da área de estudo; a área de contribuição específica, também produzida a partir do modelo digital de terreno e valores de precipitação diária da região em estudo.

O trabalho proposto foi subdividido em três etapas onde, numa primeira fase foram produzidos alguns dados de entrada (declive e bacias de drenagem), em ambiente SIG, a partir do modelo digital de terreno da área de estudo e de seguida reunidos, com os restantes dados de entrada anteriormente referidos, no programa MS Excel. Numa segunda fase foram produzidos diversos mapas de susceptibilidade, de acordo com cada metodologia, fazendo variar valores de peso volúmico, ângulo de atrito, transmissividade e recarga efectiva. Por fim, foram efectuadas diversas comparações entre os resultados por modo a estudar a variabilidade dos dados obtidos com cada técnica de análise e a validar os mapas, uma vez que não existe inventariação de movimentos de terreno. Também é discutida a aplicabilidade dos métodos determinísticos na zona em estudo, com incidência em cada bairro, e a sua viabilidade como ferramenta para estudos de carácter urbanístico.

Palavras-chave: susceptibilidade, movimentos de terreno, métodos determinísticos, precipitação.

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). The dissertation follows a subject initiated by the Nacional Laboratory of Civil Engineering (LNEC) which was aimed to provide a geological and geotechnical study for the slopes consolidation of the Southern hillside of Odivelas and has contributed to the renewed local urbanisation plan. The hillside has an area of approximately 160 hectares and includes the following neighbourhoods: Vale do Forno, Encosta da Luz, Quinta do José Luís, Serra da Luz and Quinta das Arrombas.

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. These physical-based methods allow to determine the quantitative slope stability assessment through the application of limit equilibrium methods namely the infinite slope stability method. The models use topographic, geotechnical and hydrological parameters such as slope angle, contributing area (both obtained by a DEM of the study area), soil weight, soil friction angle, soil transmissivity and daily values of rainfall.

The proposed study was divided in three phases. First, some input data (slope angle and contributing area) was produced in ArcGIS environment from a DEM of the study area. This data was then exported to MS Excel along with the rest of the parameters. In the second phase, susceptibility maps were created according to each methodology along with a variation of some parameters such as the soil weight, the soil friction angle, the soil transmissivity and the steady state recharge. Finally, a comparative analysis between the models was undergone to assess the variability of the obtain data and to validate the susceptibility maps as there is no landslide inventory. It is also discussed the applicability of the deterministic methods in the study area and its viability as a working tool for urban planning.

Key-words: susceptibility, landslide, deterministic methods, precipitation.

Abreviaturas e Siglas

AGS	<i>Australian Geomechanics Society</i> – Sociedade Australiana de Geomecânica
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
CRED	<i>Center for Research on the Epidemiology of Disasters</i> - Centro de Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres da Organização das Nações Unidas
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FS	Factor de Segurança
GEO	Geotechnical Engineering Office
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology</i> - Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Ambiental
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISSMGE	<i>International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering</i> - Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
PDM	Plano Director Municipal
REN	Reserva Ecológica Nacional
UNESCO	<i>United Nations Educational Scientific and Cultural Organization</i> - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNISDR	<i>United Nations International Strategy for Disaster Reduction</i> - Gabinete das Nações Unidas para a Redução de Desastres
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TMU	<i>Terrain Mapping Unit</i> - Unidade cartográfica de terreno
<i>apud</i>	em
e.g.	<i>exempli gratia</i> – por exemplo
et al.	<i>et alii</i> – e outros
i.e.	<i>id est</i> – isto é
n.d.	<i>no date</i> – sem data de publicação
op. cit.	<i>opere citatum</i> – obra citada

Simbologia

Alfabeto latino

a – área de contribuição (m^2)

A – área de contribuição específica ($m^2.m^{-1}$)

b – comprimento de contorno da fronteira inferior de cada área de contribuição (m)

c – coesão (kPa)

c_r – coesão das raízes (kPa)

c_s – coesão do solo (kPa)

g – aceleração gravítica ($m.s^{-2}$)

h – altura de solo saturado (m)

K_s – condutividade hidráulica saturada ($m.dia^{-1}$)

q – recarga efectiva ($m.dia^{-1}$)

q_{crit} – recarga efectiva crítica ($m.dia^{-1}$)

R – descarga lateral ($m^2.dia^{-1}$)

T – transmissividade do solo ($m^2.dia^{-1}$)

u – pressão intersticial (kPa)

w – humidade do solo ($m.m^{-1}$)

z – profundidade do solo (m)

Alfabeto grego

γ_a – peso volúmico aparente ($kN.m^{-3}$)

γ_h – peso volúmico do solo saturado ($kN.m^{-3}$)

γ_w – peso volúmico da água ($kN.m^{-3}$)

θ – declive da vertente ($^\circ$)

σ – tensão normal (kPa)

τ – tensão de corte (kPa)

φ – ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$)

Índice

Agradecimentos.....	ix
Resumo	xi
Abstract.....	xiii
Abreviaturas e Siglas.....	xv
Simbologia	xvii
Índice de figuras	xxi
Índice de tabelas	xxv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 MOVIMENTOS DE TERRENO	5
2.1.1 Características dos movimentos de terreno.....	5
2.1.2 Importância socioeconómica dos movimentos de terreno	14
2.2 ZONAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO	20
2.2.1 Conceito de susceptibilidade a movimentos de terreno.....	20
2.2.2 Zonamento e escalas	23
2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO	35
2.3.1 Métodos existentes.....	36
2.3.2 Métodos determinísticos	38
2.4 DADOS DE ENTRADA.....	39
2.4.1 Fonte dos dados de entrada	42
2.4.2 Parâmetros geoambientais e iniciadores do movimento	44
3. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	49
3.1 GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL.....	49
3.2 CLIMA.....	52
3.3 SISMICIDADE	53
3.4 OCUPAÇÃO DO SOLO.....	54
3.5 MOVIMENTOS DE TERRENO	57
3.6 ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	58
4. METODOLOGIA	63
4.1 TÉCNICAS PARA AVALIAR A SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO	63
4.1.1 Teoria da estabilidade de um talude	64

4.1.2 Técnicas de análise.....	68
4.2 PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS	75
4.2.1 Parâmetros topográficos	76
4.2.2 Parâmetros do solo	78
4.2.3 Parâmetros de precipitação	79
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	81
5.1 ZONAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE NA ÁREA EM ESTUDO	81
5.1.1 Modelação determinística absoluta.....	81
5.1.2 Modelação determinística com componente estocástica.....	103
5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E PLANEAMENTO URBANO.....	124
5.2.1 Comparação entre as recargas efectivas críticas de cada metodologia	124
5.2.2 Comparação entre as técnicas de modelação	133
5.2.3 Avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno nos bairros da Vertente Sul de Odivelas e avaliação preliminar do risco.....	135
5.2.4 Análise comparativa com a REN e o PDM de Odivelas e com os máximos de precipitação na região de Lisboa	137
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
ANEXOS.....	153
ANEXO I - Estabilidade em função de $\log(q/T)$ para os cenários 2 a 15.....	155
ANEXO II - Estabilidade em função da recarga efectiva para os cenários 2 a 15.....	159
ANEXO III - Recarga efectiva crítica para os cenários 2 a 15	169
ANEXO IV – Recarga efectiva crítica nos bairros da Vertente Sul de Odivelas para o cenário 1.....	173
ANEXO V – Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia-1, na região de Lisboa, no período de Janeiro de 2001 a Agosto de 2014	195

Índice de figuras

Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de uma queda de blocos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008).	8
Figura 2.2 - Esquema ilustrativo de um tombamento (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)	9
Figura 2.3 - Esquema ilustrativo de um escorregamento. A – escorregamento do tipo translacional; B – escorregamento do tipo rotacional (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	9
Figura 2.4 - Esquema ilustrativo de uma expansão lateral (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)	10
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo de um fluxo de detritos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)..	11
Figura 2.6 - Esquema representativo de alguns factores que afectam o desencadeamento de um movimento de terreno em solo (adaptado de Karam, 2005).....	12
Figura 2.7 - Esquema dos processos de instabilização propostos por Terzaghi num movimento de terreno (adaptado de Rodrigues et. al., 2003)	12
Figura 2.8 - Diagrama circular com o número de eventos de movimentos de terreno, por continente, entre 1985 e 2014	16
Figura 2.9 - Diagramas circulares com as perdas humanas totais e perdas humanas por evento, por continente, entre 1985 e 2014.....	17
Figura 2.10 - Diagrama circular com indicação da proporção dos custos económicos provocados por cada evento de movimento de terreno, por continente, entre 1985 e 2014	17
Figura 2.11 – Índice de vulnerabilidade a alterações climáticas na Península Ibérica (adaptado de Maplecroft, 2012).....	20
Figura 2.12 – Articulação entre os diversos conceitos fundamentais associados ao risco (adaptado de Julião et al., 2009)	23
Figura 2.13 – Relação entre a escala e a complexidade dos modelos (retirado de Glade & Crozier, 2005).....	32
Figura 3.1 – Mapa da área de estudo	49
Figura 3.2 – Mapa da altimetria da zona em estudo.....	50
Figura 3.3 – Precipitações médias mensais para a área em estudo (Sousa, 2013)	52
Figura 3.4 – Mapa da intensidade micro sísmica em Portugal continental (retirado de LNEC, 2005)	54
Figura 3.5 – Bairros da Vertente Sul de Odivelas (adaptado de Andrade et al., 2012).....	54
Figura 3.6 – Fotografia da localidade Quinta das Arrombas em primeiro plano e bairro Serra da Luz ao fundo.....	55
Figura 3.7 – Fotografia de pormenor do bairro Serra da Luz.....	56
Figura 3.8 - Distribuição da precipitação anual em São Julião do Tojal, região a norte de Lisboa, de 1956/1957 a 2000/2001 (Zêzere et al., 2005)	57
Figura 3.9 – Mapa da zona de estudo com os limiares de declive críticos para rochas sedimentares detríticas e plásticas	60
Figura 3.10 – Mapa com as zonas de aptidão à construção recomendadas no estudo de orientação para o planeamento do concelho de Odivelas	61
Figura 4.1 - Esquema ilustrativo do modelo de talude infinito (Michel et al., 2012).....	65

Figura 4.2 - Esquema ilustrativo do modelo hidrológico de regime permanente (Michel et al., 2012) .	66
Figura 4.3 - Representação esquemática da área de contribuição específica (adaptado de Pack et al., 2005).....	67
Figura 4.4 – Metodologia adoptada neste estudo para a avaliação determinística com componente estocástica.....	75
Figura 4.5 - Mapa do declive da área em estudo.....	76
Figura 4.6 - Mapa das áreas de contribuição da zona de estudo	77
Figura 5.1 - Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para o cenário 1	85
Figura 5.2 - Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para o cenário 16	86
Figura 5.3 - Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para o cenário 17	87
Figura 5.4 – Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1	89
Figura 5.5 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1	90
Figura 5.6 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1	91
Figura 5.7 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1	92
Figura 5.8 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16	94
Figura 5.9 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16	95
Figura 5.10 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16	96
Figura 5.11 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16	97
Figura 5.12 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17	99
Figura 5.13 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17	100
Figura 5.14 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17	101
Figura 5.15 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17	102
Figura 5.16 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.....	105
Figura 5.17 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.....	106
Figura 5.18 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.....	107
Figura 5.19 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.....	108
Figura 5.20 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 19.....	110
Figura 5.21 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 19.....	111
Figura 5.22 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 19.....	112

Figura 5.23 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 19.....	113
Figura 5.24 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 20.....	115
Figura 5.25 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 20.....	116
Figura 5.26 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 20.....	117
Figura 5.27 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 20.....	118
Figura 5.28 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 21.....	120
Figura 5.29 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 21.....	121
Figura 5.30 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 21.....	122
Figura 5.31 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 21.....	123
Figura 5.32 – Distribuição da percentagem da área total abrangida pelas classes incondicionais em relação ao valor do ângulo de atrito para os cenários 1 e 16 a 21.....	126
Figura 5.33 – Valores de ângulo de atrito em função da percentagem da área de estudo abrangida pelas classes incondicionalmente estável e instável, para os cenários 1 e 4 a 7, e respectivas linhas de regressão linear.....	128
Figura 5.34 – Mapa da zona de estudo com os limiares de declive críticos para rochas sedimentares detríticas e plásticas.....	138
Figura 5.35 – Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ no cenário 1.....	138
Figura 5.36 – Mapa com as zonas de aptidão à construção recomendadas no estudo de orientação para o planeamento do concelho de Odivelas (Costa Lobo & Pardal, 2003).....	139
Figura IV.A – Mapa da recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}) no bairro Quinta das Arrombas para o cenário 1.....	176
Figura IV.B – Mapa da recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}) no bairro Serra da Luz para o cenário 1.....	180
Figura IV.C – Mapa da recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}) no bairro Quinta do José Luís para o cenário 1.....	184
Figura IV.D - Mapa da recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}) no bairro Encosta da Luz para o cenário 1.....	188
Figura IV.E – Mapa de recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}) no bairro Vale do Forno para o cenário 1.....	192

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação proposta por Varnes para os tipos de movimentos de terreno em vertentes	6
Tabela 2.2 - Classificação modificada de Varnes para a velocidade do movimento (adaptado de Cruden & Varnes, 1996).....	6
Tabela 2.3 - Capacidade destrutiva dos movimentos de terreno em relação à classe de velocidade do movimento (adaptado de Cruden & Varnes, 1996).....	7
Tabela 2.4 - Sumário dos dados de número de perdas humanas, população total afectada e custos dos movimentos de terreno por continente entre 1985 e 2014 (adaptado de CRED, 2014)	16
Tabela 2.5 - Alguns dos movimentos de terreno mais mortíferos do século XX e início do século XXI (adaptado de Sidle & Ochiai, 2006; De Blasio, 2011)	18
Tabela 2.6 - Tipos de zonamento recomendados em função dos objectivos pretendidos e da escala. X – aplicável; (X) – pode ser aplicável (adaptado de AGS, 2007c).....	29
Tabela 2.7 - Níveis recomendados de zonamento em função dos objectivos pretendidos. X – aplicável; (X) – pode ser aplicável (adaptado de AGS, 2007c).....	31
Tabela 2.8 - Classificações de escala de zonamento propostas por diversos autores (adaptado de Fell et al., 2008a; Corominas & Mavrouli, 2011; Soeters & Van Westen, 1996; IAEG, 1976 apud Soeters & Van Westen, 1996).....	32
Tabela 2.9 - Técnicas de análise para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno (Soeters & Van Westen, 1996)	36
Tabela 2.10 - Métodos recomendados para a avaliação determinística da susceptibilidade a movimentos de terreno (Corominas & Mavrouli, 2011).....	39
Tabela 2.11 - Representação esquemática do conjunto de dados de base para a análise da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno (adaptado de Van Westen et al., 2008)....	41
Tabela 2.12 - Fontes dos dados de entrada e a sua relevância na análise quantitativa da susceptibilidade a movimentos de terreno para diferentes mecanismos (adaptado de Corominas et al., 2013).....	42
Tabela 2.13 - Sumário dos parâmetros geoambientais e a sua relevância na avaliação da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno em solos (adaptado de Van Westen et al., 2008).....	45
Tabela 3.1 - Coluna lito-estratigráfica da área em estudo (adaptado de Jorge & Ramos, 2012).....	51
Tabela 3.2 - Limiares de declive críticos considerados para a identificação das áreas susceptíveis à instabilidade de vertentes na área metropolitana de Lisboa (REN-AML, 2010).....	59
Tabela 4.1 - Classes de estabilidade (adaptado de Dietrich & Montgomery, 1998; Michel et al., 2012)	71
Tabela 4.2 - Classes de estabilidade utilizadas no modelo de análise SHALSTAB (adaptado de Witt, 2005).....	71

Tabela 4.3 - Classes de estabilidade do programa SINMAP (adaptado de Pack et al., 2005; Michel et al., 2012).....	73
Tabela 4.4 - Dados obtidos para as bacias de drenagem	77
Tabela 4.5 - Dados do ângulo de atrito e do peso volúmico húmido do solo	78
Tabela 4.6 - Valores registados pelo Instituto D. Luiz de precipitação máxima diária no período de 2001 a 2012 (Jorge & Ramos, 2012)	79
Tabela 4.7 - Valores de precipitação associados a instabilidades superficiais ocorridas a Norte de Lisboa no período de 1956 a 2001 (adaptado de Zêzere et al., 2005).....	80
Tabela 5.1a - Designação dos vários cenários em função dos valores do peso volúmico húmido do solo e do ângulo de atrito.....	81
Tabela 5.1b - Visualização alternativa dos vários cenários em função dos valores do peso volúmico húmido do solo e do ângulo de atrito	82
Tabela 5.2 - Valores dos limites das classes de estabilidade em $\log(q/T)$ e da recarga efectiva correspondente.....	82
Tabela 5.3 – Designações atribuídas às classes de estabilidade $\log(q/T)$ de acordo com as recargas efectivas iniciadoras da instabilidade para $T = 25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$	83
Tabela 5.4 – Valores obtidos para as classes de estabilidade $\log(q/T)$ dos cenários 1, 16 e 17, em metros quadrados e percentagem da área total	83
Tabela 5.5 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade para o cenário 1 em função da recarga efectiva	88
Tabela 5.6 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade para o cenário 16 em função da recarga efectiva	93
Tabela 5.7 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade para o cenário 17 em função da recarga efectiva	98
Tabela 5.8 – Gama de valores de transmissividade e ângulo de atrito interno analisados para os cenários 18 a 21	103
Tabela 5.9 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 18 em função da recarga efectiva	104
Tabela 5.10 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 19 em função da recarga efectiva.	109
Tabela 5.11 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 20 em função da recarga efectiva.	114
Tabela 5.12 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 21 em função da recarga efectiva.	119
Tabela 5.13 – Valores de peso volúmico húmido e ângulo de atrito interno para os cenários 1 e 16 a 21.....	125
Tabela 5.14a – Valores referentes às duas classes extremas, em metros quadrados e percentagem da área total, nos cenários 1, 16 e 17.	125
Tabela 5.14b – Valores referentes às duas classes extremas, em metros quadrados e percentagem da área total, nos cenários 18 a 21.	125

Tabela 5.15 – Área das classes extremas, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, em função do ângulo de atrito, para um peso volúmico húmido do solo de 20 kN.m ⁻³ (cenários 1 e 4 a 7).	127
Tabela 5.16a – Resumo dos valores obtidos entre os dois tipos de avaliação (cenários 1, 18 e 19), para um peso volúmico de 20 kN.m ⁻³ , e as respectivas diferenças.	129
Tabela 5.16b – Resumo dos valores obtidos entre os dois tipos de avaliação (cenários 1, 4 a 7, 20 e 21), para um peso volúmico de 20 kN.m ⁻³ , e as respectivas diferenças.....	129
Tabela 5.17a - Resultados referentes às classes de recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹), em metros quadrados e percentagem da área total, nos cenários 1, 16 e 17.....	129
Tabela 5.17a - Resultados referentes às classes de recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹), em metros quadrados e percentagem da área total, nos cenários 18 a 21.....	130
Tabela 5.18a – Valores obtidos nos cenários 1, 16 e 17, das áreas em classes não incondicionais e área das amostras em metros quadrados e percentagem das áreas não incondicionais.....	131
Tabela 5.18b – Valores obtidos nos cenários 18 a 21, das áreas em classes não incondicionais e área das amostras em metros quadrados e percentagem das áreas não incondicionais.	131
Tabela 5.19a – Valores de área geotécnica e hidrologicamente instável, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, para q_{crit} inferior a 10 mm.dia ⁻¹ (classe 1) e q_{crit} inferior a 20 mm.dia ⁻¹ (classes 1 e 2), nos cenários 1, 16 e 17.....	132
Tabela 5.19b – Valores de área geotécnica e hidrologicamente instável, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, para q_{crit} inferior a 10 mm.dia ⁻¹ (classe 1) e q_{crit} inferior a 20 mm.dia ⁻¹ (classes 1 e 2), nos cenários 18 a 21.....	132
Tabela 5.20 – Dados referentes à estabilidade em função de log(q/T) (cenário 1) e à estabilidade SI (cenários 18 e 19), em metros quadrados e percentagem da área de estudo.	133
Tabela 5.21 – Dados referentes à estabilidade em função de log(q/T) (cenário 27,9°) e à estabilidade SI (cenários 20 e 21), em metros quadrados e percentagem da área de estudo.....	134
Tabela 5.22 – Resultados de área total, área instável em metros quadrados e percentagem da área de estudo, em cada bairro, para o cenário 1.....	136
Tabela 5.23 – Comparação entre os dados do mapa de declives críticos das recomendações da REN com os dados do mapa de estabilidade log(q/T) no cenário 1.	137
Tabela 5.24 - Comparação entre os resultados do mapa de declives das zonas de aptidão à construção com os dados do mapa de estabilidade log(q/T) no cenário 1.	139
Tabela 5.25 - Informação sobre os valores climatológicos para o período de 1960 a 1990 e de 2001 a Agosto de 2014 (adaptado de IDL, 2014b).	141
Tabela I.A - Dados das classes de estabilidade log(q/T) dos cenários 2 a 15, em hectares e percentagem da área total.....	157
Tabela II.A – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 2 em função da recarga efectiva....	161
Tabela II.B – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 3 em função da recarga efectiva.	161
Tabela II.C – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 4 em função da recarga efectiva....	162
Tabela II.D – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 5 em função da recarga efectiva....	162
Tabela II.E – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 6 em função da recarga efectiva.	163

Tabela II.F – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 7 em função da recarga efectiva. ...	163
Tabela II.G – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 8 em função da recarga efectiva. ...	164
Tabela II.H – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 9 em função da recarga efectiva....	164
Tabela II.I – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 10 em função da recarga efectiva. ...	165
Tabela II.J – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 11 em função da recarga efectiva. .	165
Tabela II.L – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 12 em função da recarga efectiva. .	166
Tabela II.M – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 13 em função da recarga efectiva. .	166
Tabela II.N – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 14 em função da recarga efectiva..	167
Tabela II.O – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 15 em função da recarga efectiva. .	167
Tabela III.A - Dados referentes às classes de recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹), em hectares e percentagem da área total, nos cenários 2 a 15.	171
Tabela IV.A – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹) no bairro Quinta das Arrombas, para os cenários 1 e 16 a 21.	177
Tabela IV.B – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹) no bairro Serra da Luz, para os cenários 1 e 16 a 21.	181
Tabela IV.C – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹) no bairro Quinta do José Luís, para os cenários 1 e 16 a 21.	185
Tabela IV.D – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹) no bairro Encosta da Luz, para os cenários 1 e 16 a 21.	189
Tabela IV.E – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia ⁻¹) no bairro Vale do Forno, para os cenários 1 e 16 a 21.	193
Tabela V.A – Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia ⁻¹ , de Janeiro de 2001 a Dezembro de 2006 (IDL, 2014a).....	197
Tabela V.B – Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia ⁻¹ , de Janeiro de 2007 a Dezembro de 2012 (IDL, 2014a).....	198
Tabela V.C - Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia ⁻¹ , de Janeiro de 2013 a Agosto de 2014 (IDL, 2014a).....	199

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

A presente dissertação foi efectuada no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL) e em cooperação com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Esta tem 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.

A dissertação encontra-se no seguimento de um trabalho efectuado pelo 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; 2014a; 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 Reconversão 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”.

Este trabalho foi submetido para apresentação no XVIII Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas a realizar-se de 5 a 8 de Dezembro de 2014.

1.2 OBJECTIVOS

A presente dissertação tem por objectivo a criação de mapas quantitativos de susceptibilidade a movimentos de terreno na área de estudo de forma a contribuir para a análise do risco associada a fenómenos da geodinâmica externa na Vertente Sul de Odivelas.

Neste contexto é feito um estudo quantitativo segundo duas metodologias determinísticas diferentes para uma melhor apreciação geral da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de terreno, nomeadamente deslizamentos translacionais superficiais iniciados pela acção da precipitação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução ao trabalho proposto com um enquadramento do tema e uma descrição sucinta dos objectivos que se pretende atingir.

No segundo capítulo são abordados, por revisão bibliográfica, os principais temas inerentes ao trabalho proposto. Numa primeira parte são explicadas as características dos movimentos de terreno (classificação, tipologia e processos de instabilização) e a importância socioeconómica destes. Numa segunda parte são abordados os conceitos de zonamento da susceptibilidade onde se descreve o modelo conceptual da avaliação do risco e a sua terminologia. Nesta mesma subsecção ainda são referidos os conceitos inerentes ao zonamento na cartografia e como estes se interligam com a escala e os objectivos do trabalho. Depois são referidos os métodos de avaliação da susceptibilidade existentes e é feita uma apresentação mais pormenorizada do método determinístico, utilizado na presente dissertação. Por fim, é dedicado um subcapítulo aos dados de entrada na avaliação da susceptibilidade e à importância destes na modelação e zonamento.

No terceiro capítulo é feito um enquadramento da área de estudo em termos de geomorfologia, geologia regional e local, clima, sismicidade e ocupação do solo.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia utilizada na preparação dos dados. Numa primeira parte é apresentada a teoria de estabilidade de um talude e as duas técnicas de análise utilizadas para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno, ou seja, a modelação determinística absoluta e a modelação determinística com componente estocástica. Na segunda parte é explicada a parametrização dos modelos onde são apresentados os dados topográficos, do solo e de precipitação utilizados na concepção dos mapas de susceptibilidade.

No quinto capítulo é efectuada a apresentação e discussão dos resultados obtidos através das duas técnicas de análise. Também é realizada uma análise de sensibilidade entre os parâmetros utilizados e uma comparação entre as técnicas usadas. Ainda é feita uma avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno, para cada bairro da Vertente Sul de Odivelas, e apresentada uma estimativa da população afectada pela potencial instabilidade, de acordo com os dados do Censos 2011. Por fim, são apresentadas considerações onde se compara os resultados obtidos com os recomendados pela Reserva Ecológica Nacional e pelo Plano Director Municipal de Odivelas. Também são apresentados os máximos de precipitação diária verificados na região de Lisboa, para o período de Janeiro de 2001 a Agosto de 2014, para uma melhor contextualização dos resultados obtidos.

No sexto e último capítulo são expostas as considerações finais em relação aos dados obtidos com as duas técnicas de modelação diferentes. Também é proposto trabalho futuro no seguimento da temática do estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 MOVIMENTOS DE TERRENO

2.1.1 Características dos movimentos de terreno

Considera-se um movimento de terreno todo o deslocamento de massas instabilizadas de rocha ou solo, ou seja, agregados mais ou menos volumosos de partículas que se destacam de um dado maciço rochoso ou terroso, seguindo-se a sua movimentação, lenta ou rápida, na direcção do sopé do talude (Rodrigues, 2003). Devido à confusão de terminologia, neste trabalho serão considerados como movimentos de terreno apenas os movimentos que ocorrem em vertente, ou seja, excluindo os fenómenos de subsidência e colapso, expansão e retracção em argilas e processos de expansão lateral em superfícies com inclinação fraca ou nula.

Distinguem-se três tipos de talude (Lamas, 2012):

- Taludes naturais, onde o processo de evolução geomorfológica é estritamente natural;
- Taludes de escavação que resultam da escavação de origem antrópica em maciços naturais;
- Taludes de aterro que são taludes de estruturas de construção controlada ou não controlada.

2.1.1.1 Classificação

A expressão movimento de terrenos adquire termos mais elaborados quando existe maior informação acerca do movimento da massa instabilizada (Cruden & Varnes, 1996). Existem várias propostas de classificação de movimentos de terreno, sendo a mais conhecida a desenvolvida por Varnes (apud Cruden & Varnes, 1996), a qual é apresentada na Tabela 2.1 e que se pretende utilizar na presente dissertação.

Para a concepção do quadro, o autor correlacionou dois critérios de classificação; o tipo de movimento (critério principal) e o tipo de material (critério secundário). Distinguem-se cinco classes de movimento principal e uma de combinação de dois ou mais dos cinco tipos principais de movimento. Os escorregamentos foram subdivididos em rotacionais e translacionais, de poucas ou muitas unidades, obtendo-se assim seis tipos de escorregamento diferentes.

O material divide-se em rocha e solo, sendo que a classe de solo, dividida por Varnes em detritos e solos, refere-se a “solos de engenharia” (*engineering soils*), ou seja, materiais não coerentes no sentido da engenharia e não como solos agronómicos ou pedológicos (Rodrigues, 2003). Cornforth (2005) distingue os detritos por apresentarem na sua composição 20% a 80% de grãos com diâmetro superior a 2 mm.

Tabela 2.1 - Classificação proposta por Varnes para os tipos de movimentos de terreno em vertentes (adaptado de Varnes, 1978 apud Rodrigues, 2003)

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solos	
				predominantemente grosseiros	predominantemente finos
Queda			de rochas (<i>rock fall</i>)	de detritos (<i>debris fall</i>)	de terra (<i>earth fall</i>)
Tombamento			de rochas (<i>rock topple</i>)	de detritos (<i>debris topple</i>)	de terra (<i>earth topple</i>)
Escorregamento	Rotacional	poucas unidades	rotacional rochoso (<i>rock slump</i>)	rotacional em detritos (<i>debris slump</i>)	rotacional em terra (<i>earth slump</i>)
	Translacional		translacional em bloco rochoso (<i>rock block slide</i>)	translacional em bloco de detritos (<i>debris block slide</i>)	translacional em bloco de terra (<i>earth block slide</i>)
			muitas unidades	translacional rochoso (<i>rock slide</i>)	translacional de detritos (<i>debris slide</i>)
Expansão lateral			de rochas (<i>rock spread</i>)	de detritos (<i>debris spread</i>)	de terra (<i>earth spread</i>)
Fluência			de rochas (<i>rock flow</i>) (fluência profunda) (<i>deep creep</i>)	de detritos (<i>debris flow</i>) (fluência de solo/reptação) (<i>soil creep</i>)	de terra (<i>earth flow</i>)
Complexo			combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

Varnes (1978) também apresentou uma classificação para os movimentos de terreno com base na velocidade da massa instabilizada. A Tabela 2.2 expõe esta classificação a uma escala modificada para unidades do sistema internacional e composta por sete classes de velocidade que abrangem dez ordens de magnitude, ou seja, com o limite inferior a 16 mm.ano^{-1} ($5 \times 10^{-7} \text{ mm.s}^{-1}$) e o superior a 5 m.s^{-1} ($5 \times 10^3 \text{ mm.s}^{-1}$).

Tabela 2.2 - Classificação modificada de Varnes para a velocidade do movimento (adaptado de Cruden & Varnes, 1996)

Classe	Descrição do movimento	Velocidade (mm.s^{-1})	Velocidade típica
1	Extremamente rápido	5×10^3	5 m.s^{-1}
2	Muito rápido	5×10^1	3 m.min^{-1}
3	Rápido	5×10^{-1}	$1,8 \text{ m.h}^{-1}$
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m.mês^{-1}
5	Lento	5×10^{-5}	$1,6 \text{ m.ano}^{-1}$
6	Muito lento	5×10^{-7}	16 mm.ano^{-1}
7	Extremamente lento		

A classificação cinemática do movimento pode ser interpretada com base na escala de Mercalli de classificação da intensidade de um sismo a partir dos seus efeitos nas pessoas e nas estruturas (Tabela 2.3) (Morgenstern, 1985 apud Cruden & Varnes, 1996). É referido que os efeitos de um movimento de vertente podem ser divididos em classes com correspondências similares às classes de velocidade do movimento da escala representada no Tabela 2.2 (op. cit.).

A correlação entre a velocidade do movimento de uma massa instabilizada com a medida de capacidade destrutiva expressa na escala de Mercalli ocorre pois a velocidade do movimento afecta directamente a vulnerabilidade, e por consequente, aumenta o risco. Por exemplo, uma pequena avalanche de detritos com velocidade de classe 5 tem a capacidade de causar maior destruição que um movimento de talude de grande volume com velocidade de classe 4. De acordo com Fell et. al. (2008), o risco é uma medida da probabilidade e da severidade de um efeito adverso na saúde, propriedade ou ambiente e é estimado através do produto da probabilidade (perigosidade) pela consequência (vulnerabilidade). Os conceitos associados à avaliação do risco são apresentados no sub-capítulo 2.2.

A estimação da velocidade de uma massa instabilizada pode ser efectuada por reconhecimentos sistemáticos da posição dos objectos que sofreram deslocação, testemunhos oculares, instrumentação e outros (Cruden & Varnes, 1996). No entanto, deve ser tido em conta que a precisão das medições depende do lapso de tempo que ocorre entre as medições e da noção que, dentro da mesma massa instabilizada, as taxas de movimento podem diferir entre si.

A classificação de movimentos de terreno pela velocidade de propagação da massa instabilizada foi adoptada pelo International Geotechnical Societies em 1993 (UNESCO Working Party on World Landslide Inventory).

Tabela 2.3 - Capacidade destrutiva dos movimentos de terreno em relação à classe de velocidade do movimento (adaptado de Cruden & Varnes, 1996)

Classe de velocidade	Capacidade destrutiva provável
7	Catástrofe de elevada violência; edifícios destruídos pelo impacto e deslocação do material; número elevado de mortes; fuga improvável.
6	Algumas mortes; velocidade demasiado elevada para permitir a fuga de todas as pessoas.
5	Evacuação possível; estruturas e bens destruídos.
4	Algumas estruturas podem ser mantidas temporariamente.
3	Pode ser efectuada construção de remediação durante o movimento; algumas estruturas podem ser mantidas com manutenção frequente.
2	Algumas estruturas permanentes não sofrem danos.
1	Imperceptível sem equipamento; construção possível com precauções.

Existem outras classificações de movimentos de terreno e estas diferem bastante entre si devido às designações propostas por cada autor, aos critérios utilizados e à tendência para a adopção de sistemas de classificação que sejam facilmente adaptáveis à região em estudo (Lamas, 2012).

Os critérios geralmente utilizados para a classificação são inerentes às características dos movimentos de vertente tais como o tipo de movimento e de material envolvido, a velocidade do movimento, a dimensão e o teor em água da massa instabilizada, os processos na origem da instabilização, entre outros. Recentemente foi publicado um estudo (Alimohammadlou et. al., 2013) com uma proposta de classificação de movimentos de terreno em que o critério utilizado é o impacto socioeconómico e no meio ambiente.

Outra classificação possível para os movimentos de terreno baseia-se na profundidade a que se estabelecem os planos de rotura. As instabilizações podem assim ser classificadas como superficiais ou profundas.

2.1.1.2 Tipos de movimento

Os diversos tipos de movimento de terreno apresentam variadas terminologias devido à escassez de literatura científica existente em português (Rodrigues, 2003). Assim, as tipologias descritas neste trabalho são apresentadas com as diferentes terminologias adoptadas em português e o seu termo equivalente em inglês.

a) Queda (*Fall*)

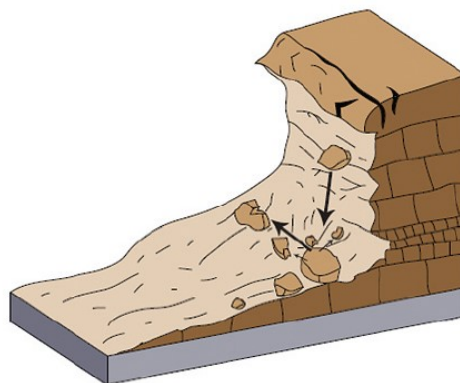


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de uma queda de blocos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Uma queda ou desabamento caracteriza-se pelo desprendimento abrupto de uma massa, de solo ou rocha, de uma parede ou vertente com elevada inclinação, ao longo de uma superfície de descontinuidade onde ocorre fraca ou nula tensão de deslocamento (praticamente não ocorre tensão de corte). O material descreve um percurso, essencialmente pelo ar, depois saltando quando embate no solo e por fim rolando. Frequentemente a queda é precedida por pequenos movimentos de

tombamento, deslizamento ou expansão lateral, que separam o material sujeito a queda da massa original (Cruden & Varnes, 1996).

Estes fenómenos de queda têm tendência a ocorrer em ambientes sedimentares onde existe alternância de camadas de maior e menor competência. O movimento é muito rápido a extremamente rápido, excepto quando a massa desprendida se encontra em consola. Nessa situação, a massa sofre primeiramente um pequeno movimento de escorregamento, seguido de tombamento, e por fim, queda (op. cit.).

b) Tombamento (*Topple*)

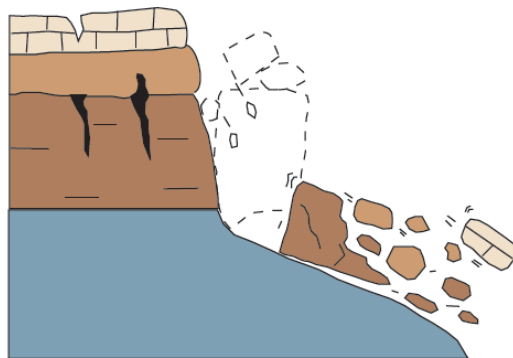


Figura 2.2 - Esquema ilustrativo de um tombamento (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Um tombamento, ou balançamento, define-se pela rotação de uma massa de solo ou rocha para fora do talude, em torno de um eixo posicionado abaixo do seu centro de gravidade. (Cruden & Varnes, 1996). Este tipo de movimento costuma ocorrer devido à acção gravítica do material adjacente à massa em movimento ou pela presença de água, no estado líquido ou sólido, nas fendas existentes no material. Os tombamentos ocorrem a uma velocidade muito variável e podem gerar quedas ou escorregamentos das massas desprendidas, dependendo da geometria das superfícies de descontinuidade e da orientação e persistência destas (op. cit.).

c) Escorregamento (*Slide*)

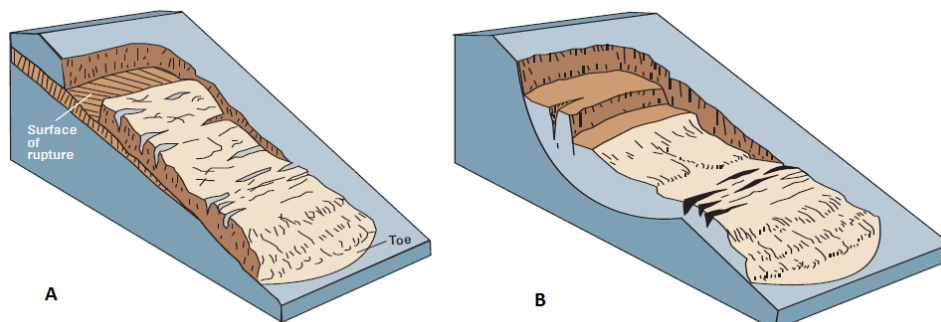


Figura 2.3 - Esquema ilustrativo de um escorregamento. A – escorregamento do tipo translacional; B – escorregamento do tipo rotacional (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Os escorregamentos, ou deslizamentos, caracterizam-se por um movimento de massa de solo ou rocha na direcção do sopé da vertente, ao longo de superfícies de rotura. Os primeiros sinais de instabilidade são marcados pelo aparecimento de fendas de pré-rotura situadas no local onde se vai originar a cicatriz principal (Cruden & Varnes, 1996; Rodrigues, 2003). A classificação de Varnes (1978) enfatiza a distinção entre os escorregamentos rotacionais e os translacionais (Tabela 2.1).

Os escorregamentos rotacionais ocorrem ao longo de superfícies de cisalhamento curvas ou côncavas. Se a superfície de rotura for circular ou cicloidal em perfil, a massa deslocada sofre muito pouca deformação interna (Cruden & Varnes, 1996). Este tipo de escorregamentos ocorre com maior frequência em materiais que exibem uma certa homogeneidade.

Nos escorregamentos translacionais a massa desloca-se ao longo de uma superfície planar a ondulada. Estes escorregamentos são geralmente mais superficiais que os escorregamentos do tipo rotacional. Enquanto ocorre o movimento, a massa deslocada pode-se fragmentar, sobretudo se a velocidade ou o teor em água aumentarem, originando fluxos de detritos ou expansões laterais (Cruden & Varnes, 1996). Os escorregamentos translacionais geralmente ocorrem ao longo de discontinuidades tais como falhas, diaclases, planos de estratificação e contactos entre solos residuais ou transportados e o substrato rochoso.

d) Expansão lateral (*Spread*)

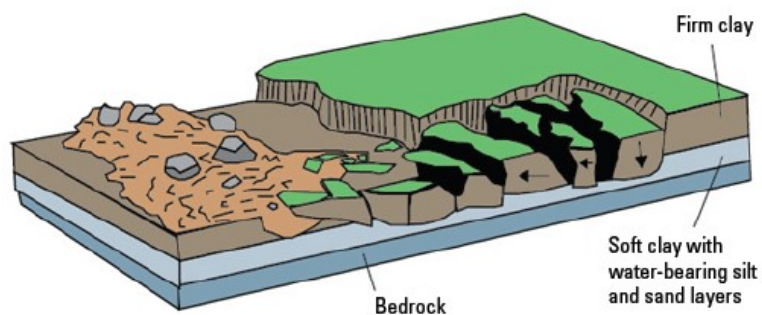


Figura 2.4 - Esquema ilustrativo de uma expansão lateral (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

De acordo com Cruden & Varnes (1996), o termo expansão (*spread*) foi introduzido na engenharia geotécnica por Terzaghi e Peck (1948) para descrever o movimento súbito de areias ou siltes embebidos em água sobre argilas homogêneas ou materiais de aterro. Os autores definem o movimento de expansão como a extensão de uma massa coesiva de solo ou rocha, combinada com uma subsidência generalizada dessa massa fracturada nos materiais subjacentes brandos. Ao longo da superfície de rotura não há cisalhamento intenso, podendo este tipo de movimento resultar de fenómenos de liquefacção ou fluxo de material mais brando. (Rodrigues, 2003).

e) Fluência (*Flow*)

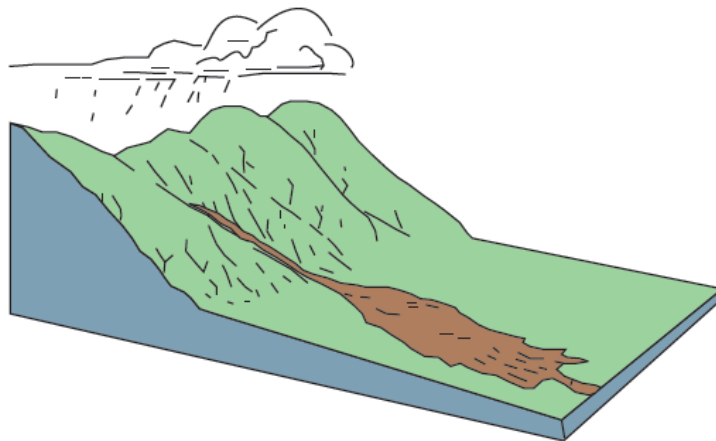


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo de um fluxo de detritos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

A fluência, ou escoada, é um movimento que apresenta uma continuidade espacial na qual as superfícies de ruptura têm uma curta duração, são estreitas e geralmente não se conservam. A distribuição das velocidades na massa deslocada assemelha-se à de um líquido viscoso (Cruden & Varnes, 1996). Varnes (1978) define a fluência por exclusão, ou seja, como um movimento que não se insere nas categorias de queda, tombamento, escorregamento ou expansão lateral (Rodrigues, 2003).

2.1.1.3 Processos de instabilização

Uma massa de solo ou rocha permanece estável se a força gravítica é contrabalançada pela reacção das forças exercidas pelos corpos adjacentes e pelo próprio terreno (De Blasio, 2011). Nesta secção propõe-se identificar os diversos factores e processos de instabilização que conduzem à degradação do equilíbrio das forças actuantes numa massa de vertente, originando assim um movimento de terreno.

Karam (2005) refere que as instabilidades de vertente são fenómenos complexos e que a sua iniciação é afectada por um número elevado de factores. Estes factores podem ser classificados em 3 categorias: factores geométricos, factores geológicos, factores hidrológicos e outros factores que também desempenham um papel importante na estabilidade de um talude (Figura 2.6). O autor refere também que uma combinação crítica destes factores, e a sua interacção, é requerida para a iniciação do movimento.

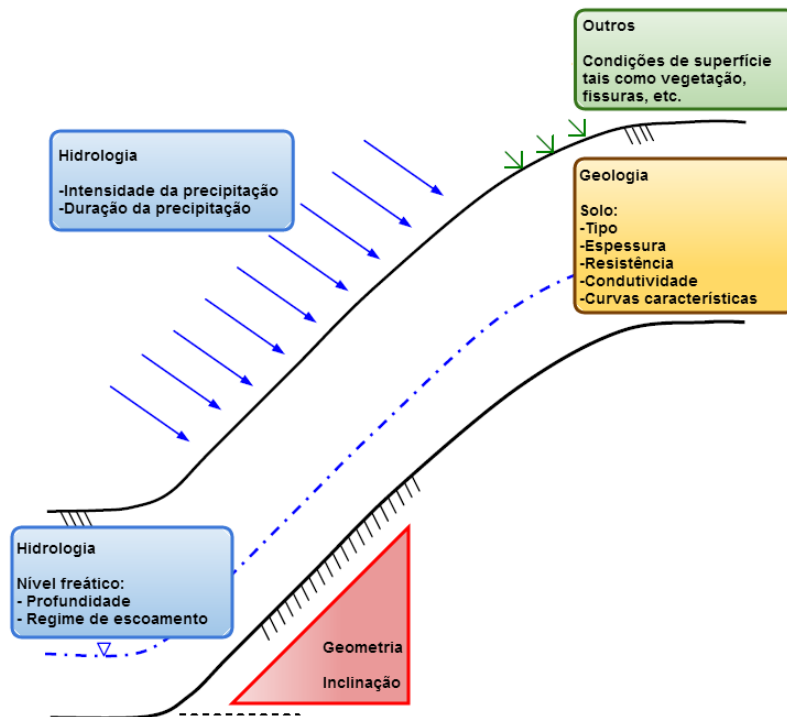


Figura 2.6 - Esquema representativo de alguns factores que afectam o desencadeamento de um movimento de terreno em solo (adaptado de Karam, 2005)

Segundo Varnes (1978), os processos envolvidos no movimento de terrenos compreendem uma série contínua de eventos, desde as causas aos efeitos. A observação destes processos pode direccionar as investigações *in situ* dos movimentos de instabilização e ajudar no desenvolvimento de medidas de remediação (Cruden & Varnes, 1996).

Terzaghi (1950) distingue dois tipos de processos que levam à instabilização de vertentes (Figura 2.7); os que conduzem a uma redução da resistência ao corte (processos internos) e os que provocam um aumento na tensão de corte (processos externos). O primeiro está relacionado com a alteração química ou física e a saturação do material enquanto o segundo se relaciona com a remoção de suporte, alteração na geometria da vertente, aumento de carga na crista e imposição de vibrações no terreno, etc. Por exemplo, um aterro construído numa encosta provoca simultaneamente um incremento de carga e alteração na geometria da vertente. Em fundações aluvionares, o aterro pode induzir rotura por expansão lateral.

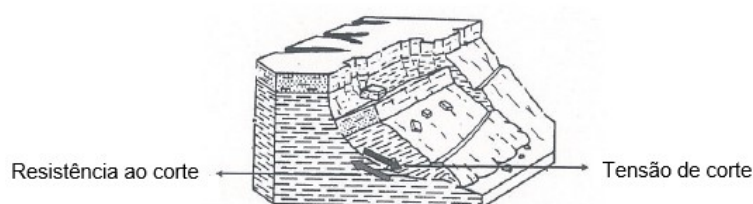


Figura 2.7 - Esquema dos processos de instabilização propostos por Terzaghi num movimento de terreno (adaptado de Rodrigues et. al., 2003)

Mais recentemente, Cruden & Varnes (1996) propuseram a distinção de três tipos de processos, de carácter geral, que causam movimentos de terreno. Os processos propostos, baseados na lista de causas (geológicas, morfológicas, físicas e antrópicas) de movimentos de terreno elaborada por Varnes (1978), são os que contribuem para as situações de a) aumento da tensão de corte, b) contribuição para uma baixa resistência do material e c) diminuição da resistência ao corte.

Segundo Cruden & Varnes (1996), as tensões de corte podem ser incrementadas por processos que conduzem à remoção de suporte, por imposição de sobrecargas e por tensões temporárias resultantes de explosões ou eventos sísmicos, o que reforça o que Terzaghi referiu em 1950. Um exemplo de remoção de suporte é a provocada nas arribas costeiras devido à acção erosiva das ondas.

A baixa resistência do material que compõe um movimento de terreno pode ser o reflexo das características inerentes ao material ou pode resultar da presença de descontinuidades (fissuras, superfícies de estratificação, foliação, etc.) na massa de solo ou rocha (Cruden & Varnes, 1996). O material pode apresentar características mais fracas devido à sua própria natureza (eg. material orgânico) ou por ter sido sujeito a processos de meteorização.

A diminuição da resistência do material pode advir de processos de alteração mas também de outras reacções físico-químicas tais como, a hidratação de minerais de argila. Disto resulta uma perda de coesão. As variações de temperatura podem originar expansões e contracções térmicas, responsáveis por alterações no comportamento do material. Também a saturação pode diminuir a resistência do material, por redução da tensão efectiva intergranular e destruição da pressão de capilaridade.

Segundo Hervás & Delattre (2010), a habilidade para prever a ocorrência de uma instabilização é um pré-requisito para uma mitigação eficaz. Deve ser tido em conta que, em solos de granulometria fina, a rotura do talude é parte de um processo a longo prazo e que a análise dos elementos percussores (precipitação e ciclos hidrológicos) e geoindicadores (movimentos observados) é essencial para uma previsão com elevada taxa de sucesso. Por outro lado, em rochas ou solos grosseiros, o tempo decorrido entre a iniciação do processo de rotura e o colapso do talude é muito pequeno, requerendo assim critérios de previsão e alerta de carácter instantâneo.

Em Portugal foi realizado um estudo (Piedade et al., 2011) em que se verificou que os factores de predisposição de dois tipos específicos de movimento de terreno (escorregamentos rotacionais e translacionais) apresentavam importância distinta nas três áreas de estudo onde se conduziu a investigação (Torre de Moncorvo, Caldas da Rainha e Santarém). No entanto, o declive e a geologia estavam sempre entre as três variáveis mais importantes, confirmando a sua independência do contexto geológico e geomorfológico.

2.1.2 Importância socioeconómica dos movimentos de terreno

As pressões associadas ao crescimento populacional estão a aumentar em várias regiões do globo e sofrerão, com certeza, uma aceleração no futuro. Estas pressões têm resultado numa rápida urbanização e desenvolvimento, sobretudo em zonas declivosas (Schuster & Highland, 2007). Tal acontece devido à expansão das fronteiras urbanas, que obriga a uma instalação de residências e infra-estruturas em zonas cada vez menos competentes do ponto de vista geológico-geotécnico.

Schuster & Highland (2007) referem que o desenvolvimento e a construção de infra-estruturas, relacionadas com os transportes urbanos, os sistemas de comunicação e de saneamento, entre outros, inerentes ao desenvolvimento urbanístico, movimentam volumes significativos de material. Parte desta perturbação é feita em zonas declivosas que são susceptíveis à rotura de talude. Estas instalações também aumentam a área de superfícies impermeáveis, conduzindo a um excesso de fluxos superficiais com infiltração nas zonas não impermeabilizadas e aumentando o potencial de instabilização das vertentes.

As principais alterações antrópicas das vertentes que podem contribuir para a sua instabilização são o reperfilamento dos taludes em ângulos críticos, a construção de estruturas no topo de um talude com estabilidade marginal, a drenagem de águas pluviais para zonas que não estão preparadas para a recarga excessiva, a adição de água nos taludes por sistemas de irrigação e a remoção da vegetação ou a colocação de espécies arbóreas pesadas que contribuem para a instabilidade.

Os autores também aludem para o facto de as populações optarem por uma instalação residencial em zonas declivosas, não só pelas pressões inerentes à expansão populacional, mas também pela atractividade que a vista de uma casa situada numa encosta pode oferecer. Esta tendência de urbanização em zonas declivosas menos competentes verifica-se sobretudo em países em desenvolvimento, onde as consequências são mais gravosas por haver pouco investimento devido à falta de recursos (Petley, 2012).

Outro factor para o aumento de actividade de movimentos de terreno em países em desenvolvimento é a desflorestação em grande escala. (Schuster, 1996). Segundo este autor, a desflorestação é feita a ritmos muito elevados causando um aumento de probabilidade de cheias, erosão do solo e consequentemente, instabilidades de vertente. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2012), cerca de 7,3 milhões de hectares de área florestal são removidos todos os anos. A título de exemplo, a América do Sul registou uma perda líquida de 88 milhões de hectares de floresta entre 1990 e 2010. Neste sentido, prevê-se que as instabilidades de vertente sejam um dos perigos geológicos mais significativos a afectar novos empreendimentos, sobretudo nos países em desenvolvimento, e com tendência a aumentar no decorrer do século XXI.

De acordo com Hervás & Delattre (2010), o risco associado a movimentos de terreno também está a aumentar em consequência das alterações climáticas, e potencial aquecimento global, registadas em todo o planeta. É esperado um incremento de actividade associada a movimentos de terreno devido ao

aumento de precipitação, mudanças nos ciclos hidrológicos, mais eventos climáticos extremos, precipitação intensa em curtos períodos e tempestades no mar que causam erosão costeira.

2.1.2.1 Perdas económicas e humanas

Os movimentos de terreno são responsáveis por perdas socio-económicas maiores que as efectivamente reconhecidas, pois estas representam uma fracção significativa de outros desastres naturais que compreendem diversos perigos. Muitos dos movimentos de terreno não são documentados, uma vez que são considerados como um resultado de um processo em eventos noticiados como sismos, cheias, erupções vulcânicas ou tempestades. Porém, os custos das perdas devidas a movimentos de terreno excede os outros custos associados a um evento de perigos múltiplos (Schuster, 1996; Hervás & Delattre, 2010). Tal acontece por existir uma tendência de classificar os eventos pelas acções desencadeadoras (sismos, tempestades, etc.) em detrimento do processo (Petley et al, 2005). Por exemplo, um movimento de terreno iniciado por uma acção sísmica será classificado como desastre sísmico. Esta subestimação sistemática do impacto das instabilidades de vertente tem contribuído para a redução da percepção do risco dos movimentos de terreno, tanto para as autoridades como para o público em geral.

Os poucos países, geralmente os mais desenvolvidos, que têm efectivamente desenvolvido progressos na mitigação de problemas geológico-geotécnicos em contexto urbano, são aqueles que o fizeram por necessidade após uma rápida expansão urbana e demográfica que provocaram situações de conflito com o meio geológico (Silva, 2000).

Em Portugal continental, de acordo com Quaresma & Zêzere (2011), no período 1900-2009, as cheias e movimentos de terreno foram responsáveis por 986 mortes (média de 10 mortes por ano), 696 feridos e 211 desaparecidos. O número de evacuados e desalojados reportados devido a instabilidades de vertente ascendeu a 13 920 nesse período.

A uma escala mais global, pode consultar-se a Tabela 2.4, que apresenta um sumário das perdas humanas e económicas, por continente, nos últimos 30 anos. Também é discriminado o número de eventos de movimentos de terreno e a população total afectada por cada evento. Os dados foram recolhidos da base de dados sobre desastres a nível internacional (EM-DAT) do Centro de Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres (CRED) da Organização das Nações Unidas.

Nesta tabela sumariada juntaram-se os movimentos de terreno classificados como desastres geofísicos (*dry mass movement - landslide*) e os classificados como desastres hidrológicos (*wet mass movement - landslide*), tal como é distinguido pelo CRED, de onde a tabela foi adaptada. Os primeiros são os provocados por eventos sísmicos e os últimos por precipitação e subsequente variação do nível freático.

Tabela 2.4 - Sumário dos dados de número de perdas humanas, população total afectada e custos dos movimentos de terreno por continente entre 1985 e 2014 (adaptado de CRED, 2014)

	Número de eventos	Mortos	Pop. total afectada	Custos (milhares US\$)
África	29	901	44 472	-
	Média por evento	31,1	1 533,5	-
América	109	5 278	740 038	1 508 200
	Média por evento	48,4	6 789,3	13 836,7
Ásia	239	13 940	7 891 585	2 675 916
	Média por evento	58,3	33 019,2	11 196,3
Europa	21	644	24 369	1 623 000
	Média por evento	30,7	1 160,4	77 285,7
Oceânia	16	509	20 715	-
	Média por evento	31,8	1 294,7	-

Hervás & Delattre (2010) crêem que os números apresentados na base de dados do CRED, aqui sumarizados na Tabela 2.4, apresentam uma elevada subestimação pois a base de dados não regista os eventos com fatalidades inferiores a 10 pessoas, resultando numa exclusão da maior parte dos eventos.

Segundo Zêzere et al. (n.d.), a definição e os critérios considerados pela base de dados do CRED para inclusão de uma ocorrência na sua base de dados são demasiado restritivos, o que faz com que muitos eventos ocorridos em Portugal continental, que provocaram perdas relevantes, a nível económico e social, não estejam incluídos.

As Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 são o resultado de uma breve análise da Tabela 2.4. Na Figura 2.8 observa-se que os movimentos de terreno ocorrem maioritariamente na Ásia e na América em detrimento dos outros continentes; África, Europa e Oceânia. De acordo com Guha-Sapir & Hoyois (2012), os países do sul e sudeste asiático são os principais contribuintes para o elevado número de desastres no continente asiático pois encontram-se nos percursos de ciclones e tufões e também partilham zonas com elevado grau sísmico e vulcânico.

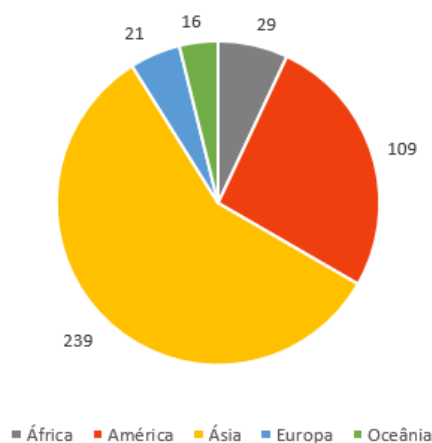


Figura 2.8 - Diagrama circular com o número de eventos de movimentos de terreno, por continente, entre 1985 e 2014

Numa análise mais detalhada da Tabela 2.4 (Figura 2.9), verifica-se que as perdas humanas apresentam a mesma proporção que o número de movimentos de terreno por continente. Tal é explicado pelo número de perdas humanas por movimento de terreno, cujo valor é da mesma ordem de grandeza em qualquer continente. Segundo Guha-Sapir & Hoyois (2012), a elevada densidade populacional na Ásia e as grandes metrópoles na América Latina influenciam o número de vítimas e conduzem a desastres de grande impacto.

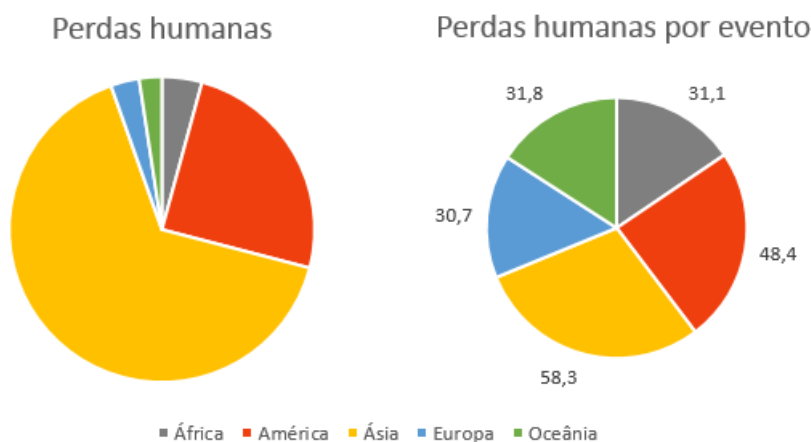


Figura 2.9 - Diagramas circulares com as perdas humanas totais e perdas humanas por evento, por continente, entre 1985 e 2014

No entanto, analisando os valores das perdas económicas por cada evento (Figura 2.10), verifica-se que existe uma significativa incidência dessas perdas no continente europeu. Em termos absolutos, conclui-se que as maiores perdas económicas registam-se nos países mais ricos, representando os mais pobres valores mais baixos (Guha-Sapir & Hoyois, 2012).

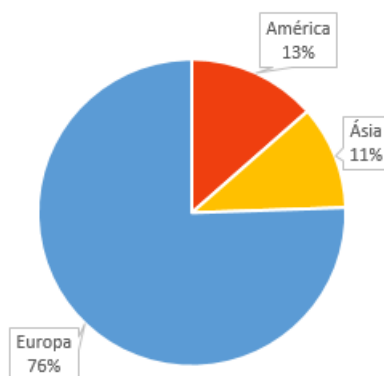


Figura 2.10 - Diagrama circular com indicação da proporção dos custos económicos provocados por cada evento de movimento de terreno, por continente, entre 1985 e 2014

Da análise anterior verifica-se que, apesar dos avanços na compreensão dos mecanismos em que resultam as instabilidades de vertente e das técnicas de mitigação, estas continuam a causar grandes perdas económicas e humanas.

Na Tabela 2.5 são apresentados alguns movimentos de terreno com maior expressão socioeconómica no século XX e início do século XXI. Pode-se constatar que a maioria dos movimentos de terreno têm como factor iniciador da instabilidade um evento sísmico ou fenómenos de precipitação intensa.

Tabela 2.5 - Alguns dos movimentos de terreno mais mortíferos do século XX e início do século XXI (adaptado de Sidle & Ochiai, 2006; De Blasio, 2011)

Localização	País	Data	Causa da instabilidade	Mortos
Província Gansu	China	16 Dez 1920	Sismo (M=8,5)	180 000
Caracas	Venezuela	15 Dez 1999	Precipitação intensa	30 000
Armero	Colômbia	13 Nov 1985	Degelo causado por erupção vulcânica	23 000 – 25 000
Yungay	Perú	31 Mai 1970	Sismo (M=7,7)	18 000
Khait	Tajiquistão	1949	Sismo (M=7,5)	12 000 – 18 000
Sichuan	China	1933	Sismo (M=7,5)	6 800
Kedri	Indonésia	1919	Drenagem de Crater Lake	5 160
Yungay	Perú	10 Jan 1962	Avalanche de detritos	4 000 – 5 000
Longarone	Itália	9 Out 1963	Subida dos níveis freáticos	1 899
Guinsahugon	Filipinas	17 Fev 2006	Precipitação intensa	1 800
Shizuoka	Japão	Set 1958	Tufão	1 094
Rio de Janeiro	Brasil	Jan 1966	Precipitação intensa e desflorestação	1 000
Napo	Equador	5 Mar 1987	Sismos (M=6,1 e M=6,9)	1 000
Alma- Ata	Cazaquistão	1921	Degelo	500
Rupanco	Chile	Mai 1960	Sismo (M=7,5) e precipitação intensa	210

2.1.2.2 Papel das autoridades

As autoridades necessitam de mapas que indiquem a possibilidade de instabilidade das vertentes para consideração em planos directores municipais e/ou implementação de técnicas de mitigação. Neste sentido algumas agências governamentais têm vindo a estabelecer políticas de prevenção, controlo e resposta com a intenção de as introduzir como legislação. É o caso de instituições como o Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire - Suíça (OFAT, OFEE, OFEFP, 1997), a Australian Geomechanics Society - Austrália (AGS, 2007a, 2007b) e o Geotechnical Engineering Office - China (GEO, 2011).

A implementação da 1ª edição da legislação do Geotechnical Engineering Office de Hong Kong, antigo Geotechnical Control Office, em 1979 (GEO, 2011), fez com que o número de mortes anuais na China,

causadas pelas instabilidades de vertente, diminuíse consideravelmente nas décadas que se seguiram (Malone, 1998; Petley, 2012). O Geotechnical Control Office instalou 46 pluviómetros durante os anos de 1978 e 1984, e estudou a precipitação atmosférica de duas décadas (1963-1983) obtendo assim dados imprescindíveis para a compreensão dos mecanismos de iniciação de movimentos de terreno em Hong Kong. Os dados obtidos permitiram concluir que era iniciado um maior número de movimentos de terreno aquando de precipitações intensas de curta duração do que com as precipitações cumulativas (Cornforth, 2005).

Alguns guias (Fell et al, 2008; Corominas & Mavrouli, 2011) propõem uma unificação da terminologia com destaque dos dados necessários para a preparação dos mapas e das análises. Contudo as metodologias utilizadas divergem de país para país e mesmo dentro do mesmo país. As divergências verificadas entre as metodologias de diferentes países deve-se às diferentes percepções dos conceitos de susceptibilidade, perigosidade, vulnerabilidade e risco, por falta de uma terminologia unificada até recentemente (Corominas & Mavrouli, 2010). Os autores referem que, na Europa, apenas algumas das metodologias de avaliação do risco de instabilidade de vertentes são empregues oficialmente por organizações administrativas, institutos e responsáveis pela gestão do território. Até ao ano de 2010, as cartas de risco produzidas com carácter oficial situam-se em França, Itália, Noruega e Suíça.

2.1.2.3 Influência das alterações climáticas

Ao longo da história do planeta têm sido frequentes as variações climáticas, e algumas das mudanças actualmente registadas fazem parte desta variabilidade natural do clima terrestre. No entanto, estudos efectuados por diversas organizações, destacando-se o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), têm confirmado a existência de uma relação causa-efeito entre as emissões de origem antropogénica dos gases com efeito de estufa e as alterações climáticas. Estas últimas referem-se a qualquer mudança substancial nos dados de medida do clima (e.g. temperatura ou precipitação atmosférica) estendendo-se por períodos prolongados - décadas ou mais (EPA, 2014).

De acordo com o último relatório do IPCC (IPCC, 2013; 2014a; 2014b), o aquecimento do clima é inequívoco e, desde a década de 50, muitas das alterações observadas não têm precedentes. A atmosfera e os oceanos têm sofrido um aquecimento, as quantidades de neve e gelo diminuíram, o nível do mar tem subido e as concentrações de gases de estufa têm aumentado.

A subida da temperatura global potencia o incremento de taxa de evaporação e da capacidade de armazenamento da humidade na atmosfera, o que por sua vez altera o ciclo hidrológico e modifica os padrões de precipitação atmosférica. A variação da precipitação altera por sua vez os regimes de escoamento e o teor em água do solo, promovendo uma maior desestabilização das vertentes (Eslamian, 2014).

Estudos demonstram, através de simulações de modelos climatéricos, que nos próximos 10 a 60 anos os eventos de seca e cheias serão mais frequentes em muitas regiões do planeta. Este é o caso da Península Ibérica que já é actualmente considerada como uma região propensa a períodos de seca

(Belo-Pereira et al., 2011) (Figura 2.11). No entanto, de acordo com o 5º relatório de avaliação das alterações climáticas do IPCC (IPCC, 2013), uma região que apresente mais e maiores períodos de seca, devido às alterações climáticas, também é susceptível de apresentar mais eventos extremos, nomeadamente precipitações intensas.

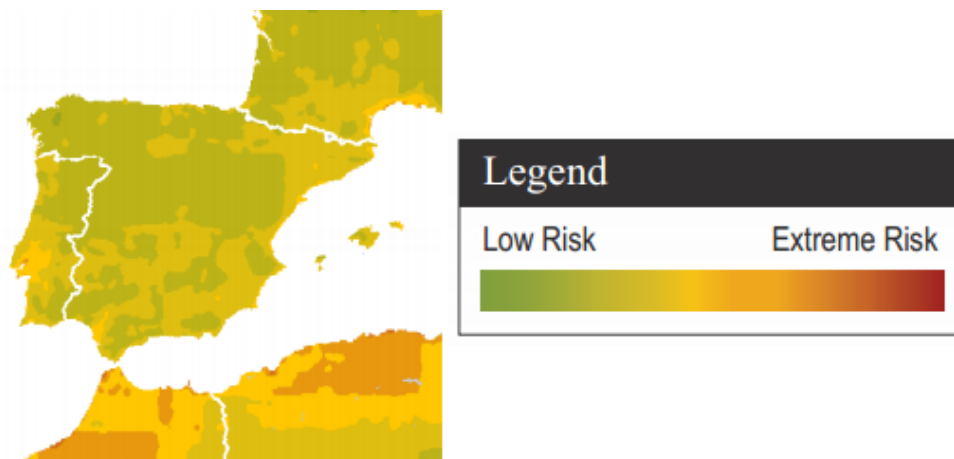


Figura 2.11 – Índice de vulnerabilidade a alterações climáticas na Península Ibérica (adaptado de Maplecroft, 2012)

De acordo com o IPCC (2014a), muitos riscos globais inerentes às alterações climáticas encontram-se concentrados em áreas urbanas. Temperaturas e precipitação extremas, cheias, movimentos de vertente, poluição do ar, secas e escassez de água impõem sérios riscos às populações, economias e ecossistemas em contexto urbano. A redução dos défices de serviços, a melhoria das habitações e o incremento da capacidade de resistência das infra-estruturas podem reduzir significativamente a vulnerabilidade e a exposição das áreas urbanas. Assim, o sucesso da adaptação às alterações climáticas pode ser conseguido através do aumento da capacidade de resistência a estas e de um desenvolvimento sustentável.

2.2 ZONAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO

2.2.1 Conceito de susceptibilidade a movimentos de terreno

O presente trabalho centra-se na determinação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de terreno numa localidade do concelho de Odivelas. Na avaliação da susceptibilidade, é importante atentar aos conceitos incluídos no modelo conceptual de avaliação do risco; susceptibilidade, perigosidade, vulnerabilidade e risco.

2.2.1.1 Terminologia

Neste trabalho optou-se por seguir a terminologia adoptada nos mais recentes guias de referência internacional, tais como “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning” (Fell et al., 2008a) e os associados ao projecto SafeLand (Nadim et al., 2009; Corominas & Mavrouli, 2011), na temática da avaliação da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno e mitigação do risco.

A terminologia apresentada tem por base a estabelecida por Varnes (1984), com algumas modificações e adições. Esta também é baseada na terminologia apresentada pelas entidades Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE) e Gabinete das Nações Unidas para a Redução de Desastres (UNISDR), em “Risk assessment – Glossary of terms” (ISSMGE, 2004) e “Terminology of Disaster Risk Reduction” (UNISDR, 2009), respectivamente.

Até esta nova terminologia ser apresentada, a que vigorava a nível internacional era a de Varnes (1984), presente no documento “Landslide hazard zonation: a review of principles and practice” apresentado no âmbito do programa Desastres Naturais (*Natural Hazards*) da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO). Este documento foi pedido pela UNESCO à Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Ambiente (IAEG) com o intuito de estabelecer uma metodologia de referência a nível internacional para a avaliação da perigosidade a movimentos de terreno e uma terminologia unificada sobre a temática.

No entanto, a aplicação das definições de Varnes para a conceptualização do risco não foi totalmente evidente pois houve alguma dificuldade em encontrar equivalentes noutras línguas para o termo *hazard* (Zêzere, 2001). Por exemplo, em França, o termo *natural hazard* foi substituído por *risque naturel* e, conseqüentemente, por tradução sistemática, em Portugal por risco natural. De modo a evitar os problemas de terminologia aquando da implementação dos Plans d’Exposition aux Risques em França em 1983, a designação de *risque naturel* foi substituída por *aléas* (op.cit.).

As definições dos conceitos mais comuns do modelo conceptual da avaliação do risco, adoptadas actualmente, apresentam-se de seguida.

Conceitos gerais:

Susceptibilidade a movimentos de terreno (*Landslide Susceptibility*) – Avaliação quantitativa ou qualitativa da classificação, do volume (ou área) e da distribuição espacial de instabilidades de vertente que existam ou possam ocorrer numa dada área. A susceptibilidade pode incluir uma descrição da velocidade e intensidade de uma dada massa instabilizada, existente ou potencial. Segundo Julião et al. (2009), a susceptibilidade é uma incidência espacial do perigo e representa a propensão para uma área ser afectada por um determinado perigo, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência.

Perigosidade (*Hazard*) – Condição com o potencial de causar consequências indesejadas. A descrição de perigosidade a movimentos de terreno deve incluir a localização, volume (ou área), classificação e velocidade de instabilidades de vertente potenciais e de qualquer material destacado resultante dessa mesma instabilização, e a probabilidade da sua ocorrência num dado período de tempo.

Risco (*Risk*) – Medida da probabilidade e severidade de um efeito adverso na saúde, propriedade ou ambiente. O risco é habitualmente estimado pelo produto da probabilidade com a consequência.

Varnes (1986), no relatório apresentado à UNESCO, define o conceito de risco em dois elementos distintos; risco total (R_t) e risco específico (R_e). Estes conceitos são traduzidos pela equação seguinte:

$$R_t = E \times R_e = E (P \times V)$$

em que: E = elementos em risco;
P = perigosidade;
V = vulnerabilidade.

Conceitos associados à perigosidade:

Perigo (*Danger*) – Fenómeno natural que pode resultar em dano, descrito em termos da sua geometria e características mecânicas ou outras. O perigo pode ser existente (e.g. fenómenos de fluência) ou potencial (e.g. queda de blocos) e a sua caracterização não tem em conta a previsão.

Probabilidade (*Probability*) - Medida do grau de certeza. Esta medida varia entre o valor de 0 (impossibilidade) e 1 (certeza). É possível estimar a probabilidade da magnitude de uma massa deslocada ou a probabilidade de ocorrência de um evento futuro.

Magnitude (*Magnitude*) – Medida do tamanho da massa instabilizada. Pode ser descrita quantitativamente pelo seu volume ou indirectamente pela área. A magnitude pode ser calculada pelo depósito ou pela cicatriz provocados pela instabilidade de vertente.

Intensidade (*Intensity*) – A intensidade de um movimento de terreno pode ser medida por um conjunto de parâmetros relativos ao poder destrutivo deste. Os parâmetros podem ser descritos qualitativa ou quantitativamente e podem incluir a velocidade máxima do movimento, o deslocamento total ou diferencial, a profundidade da massa instabilizada ou a energia cinética por unidade de área.

Conceitos associados ao risco:

Vulnerabilidade (*Vulnerability*) – Grau de perda de um dado elemento, ou de um conjunto de elementos, exposto a uma ocorrência de instabilidade de vertente de uma dada magnitude/intensidade. A vulnerabilidade é expressa numa escala que varia de 0 (ausência de danos) a 1 (destruição total). Em termos de perdas materiais, nomeadamente propriedades, esta é calculada através do valor do dano relativo em relação ao valor da propriedade. Em relação a perdas humanas, a vulnerabilidade é expressa através da probabilidade de haver mortes tendo em conta o número de pessoas afectadas pela instabilidade de vertente.

Consequência (*Consequence*) – O resultado, potencial ou real, de uma ocorrência de instabilidade de vertente expressa quantitativa ou qualitativamente em termos de perda, dano, lesão ou morte.

Elementos em risco (*Elements at risk*) – Todos os elementos que se encontrem na área potencialmente afectada por instabilidades de vertente, i.e. a população, edifícios e obras de engenharia, actividades económicas, infra-estruturas e elementos ambientais.

A Figura 2.12 demonstra a articulação entre os diversos conceitos apresentados.

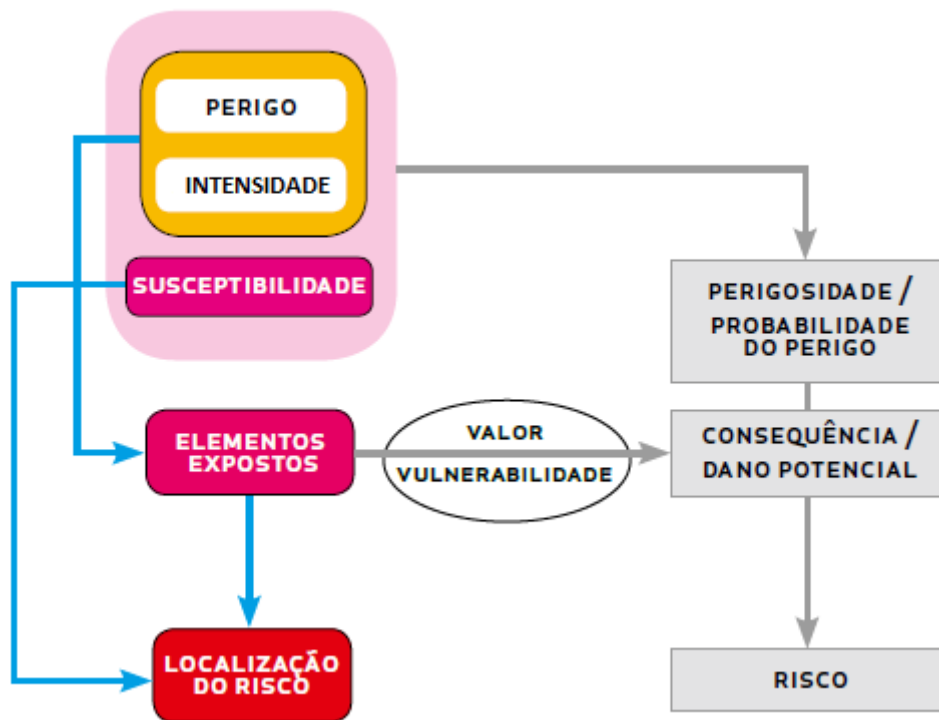


Figura 2.12 – Articulação entre os diversos conceitos fundamentais associados ao risco (adaptado de Julião et al., 2009)

2.2.2 Zonamento e escalas

O zonamento de movimentos de terreno é o processo de divisão de uma região em áreas homogéneas e a sua classificação de acordo com os graus de potencial ou actual susceptibilidade, perigosidade ou risco (Fell et al., 2008a; Corominas & Mavrouli, 2011; Corominas et al., 2013). O pormenor e grau de homogeneidade dependem da escala, do objectivo e dos dados disponíveis para análise.

O zonamento de movimentos de terreno para propósitos de planeamento urbano é normalmente requerido por instituições de governo local, como câmaras municipais, ou instituído na legislação nacional (e.g. Declaração de Rectificação n.º 71/2012 ao Decreto Lei n.º 192 de 3 de Outubro de 2012). O zonamento para fins de planeamento urbano é recomendado no desenvolvimento de áreas

residências, na reestruturação de um plano director municipal em zonas urbanas propensas a instabilidades de vertente, no desenvolvimento de infra-estruturas de maior importância, na projecção de áreas de lazer e na construção de infra-estruturas de grande dimensão tais como auto-estradas ou vias férreas (Fell et al., 2008a).

Segundo Corominas & Mavrouli (2011), as primeiras aplicações formais de zonamento de movimentos de terreno aconteceram na década de 1970, sob forma de uma abordagem qualitativa. Os métodos ditos quantitativos foram desenvolvidos no final da década de 1980 e particularmente na década de 1990 para avaliação do risco em taludes individuais.

A partir da década de 2000 efectuaram-se os maiores desenvolvimentos relativamente à temática do zonamento, destacando-se a Australian Geomechanics Society (AGS) na elaboração de um guia destinado à gestão do território (AGS, 2007c) e o guia elaborado por Fell et al. (2008a; 2008b) destinado ao planeamento urbano. Com estes desenvolvimentos surgiram questões relacionadas com a escala de trabalho e o erro associado (Cascini et al., 2005; Glade & Crozier, 2005; Van Westen et al., 2006).

De acordo com Fell et al. (2008a), o zonamento costuma ser efectuado onde os movimentos de terreno possam vir a constituir um perigo, ou seja, nas seguintes situações:

- a) onde existe um historial de instabilizações de vertente;
- b) onde não existe um historial de instabilizações, mas a inclinação na vertente indica propensão para tal (e.g. arribas costeiras, taludes naturais com inclinação superior a 20°, etc.);
- c) onde não existe um historial de instabilizações, mas as condições geológico-geotécnicas do terreno são tais que a rotura do talude pode ocorrer (e.g. rochas alteradas, material competente sobreposto a formações argilosas, taludes naturais em regiões afectadas por sismos ou precipitação intensa, etc.);
- d) onde existem elementos estruturais que em caso de rotura podem atingir velocidade elevadas (e.g. paredes de retenção, escombreiras em zonas declivosas, barragens de rejeitados, etc.);
- e) áreas florestais ou agrícolas onde as consequências de um movimento de terreno poderiam danificar o meio-ambiente por meio de obstrução de linhas de água.

De seguida são apresentados em maior detalhe os elementos que fazem parte do processo de zonamento, tais como as unidades cartografáveis de terreno (unidades homogéneas), os tipos de zonamento, os objectivos atingidos com o estudo em geral e os níveis existentes de zonamento. Também é abordada a relação destes conceitos com a escala e, por consequente, com a incerteza associada no estudo efectuado.

2.2.2.1 Unidades cartografáveis de terreno

Para se proceder ao estudo da probabilidade de instabilidades de vertente num dado terreno é necessário escolher a unidade cartográfica de terreno (*terrain mapping unit*), ou seja, a unidade cartográfica de referência mais adequada. Esta unidade de referência terá que ter em conta o tipo de zonamento pretendido, o objectivo do estudo e/ou a escala. O termo “unidade cartográfica de terreno” (TMU), refere-se a uma porção de terreno que contém um dado grupo de condições previamente estabelecidas e que diferem das contidas nas unidades adjacentes ao longo de limites definidos. Isto é, a determinada escala de análise, uma TMU representa um domínio que maximiza a homogeneidade interna de uma unidade e a heterogeneidade entre estas (Guzzetti, 2005). No entanto, Guzzetti (2005) refere que alguns especialistas têm manifestado oposição em relação ao conceito de separações distintas entre as diferentes unidades e sugerem que as variações no terreno são mais contínuas que discretas, propondo assim uma aproximação mais contínua à classificação do terreno.

Em termos de divisões distintas entres as diferentes TMU, existem vários métodos de classificação e Guzzetti (2005) defende que as TMU propostas se inserem nas seguintes categorias: células matriciais, unidades de terreno, unidades de condição única, unidades de declive, unidades hidrogeológicas, unidades topográficas e unidades administrativas.

As células matriciais dividem o terreno em áreas regulares de tamanho pré-definido. Pertencem a um modelo representativo do espaço que recorre à discretização ou subdivisão do espaço em células geometricamente regulares e identificáveis por um índice de linha e coluna (Brito, n.d.). Estas são sobretudo utilizadas em ambientes de formato *raster*. As células costumam ser quadradas, rectangulares, triangulares ou hexagonais. Para as diferentes células é designado um valor para cada factor em consideração (morfológico, litológico, uso do solo, etc.). A maior limitação no uso de células matriciais prende-se com a representação de factores contínuos (e.g. morfológicos e litológicos) em formato discreto e a representação de elementos lineares ou não lineares em células de tamanho pré-definido (Guzzetti, 2005).

De acordo com Guzzetti (2005), as unidades de terreno são preferencialmente utilizadas por geomorfologistas. Estas baseiam-se na observação de que as relações entre os materiais, formas e processos dão origem a limites que reflectem as diferenças geomorfológicas e litológicas. Segundo aquele autor, a maior limitação na definição das unidades de terreno é a sua subjectividade, pois há dificuldade em estabelecer regras de aplicação sistemática, que criem limites entre unidades de forma totalmente clara. O autor também refere que, em estudos de avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno, é difícil inferir o grau de propensão a instabilidades de vertente unicamente com base em formas e processos geomorfológicos, e derivar esta informação em subdivisões objectivas do terreno.

As unidades de condição única foram desenvolvidas no âmbito da investigação de recursos minerais. Estas implicam a classificação de cada factor de controlo, ou condicionante, da instabilidade de vertente num número significativo de classes. Por sobreposição sequencial das camadas, os domínios homogéneos (e.g. unidades de condição única) são definidos em número, tamanho e forma, de acordo

com os dados de entrada. (op. cit.). Guzzetti (2005) refere que, em termos conceptuais, as unidades de condição única representam um problema quando aplicadas a camadas com informação temática contínua tais como elevação, declive, espessura das camadas, etc., pois deve ser feita uma classificação com um pequeno número de classes. Também, a sobreposição sistemática das diferentes camadas pode dar origem a um elevado número de polígonos de condição única, tornado assim a sua interpretação difícil ou mesmo impraticável.

As unidades de declive dividem o terreno em regiões hidrológicas definidas pela drenagem. Estas podem ser facilmente definidas com recurso a softwares especializados do tipo SIG, que garantem uma divisão objectiva e reprodutível do terreno (op. cit.). De acordo com Guzzetti (2005), esta subdivisão é particularmente adequada para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno, pois estes tendem a ocorrer em vertentes, ou seja, em declives. As principais limitações da utilização de unidades de declive prendem-se com o facto de se ter que recorrer a software especializado e de as fronteiras hidrológicas poderem não corresponder às subdivisões geomorfológicas ou de uso do solo.

As limitações encontradas nas unidades de declive podem ser atenuadas com recurso à adopção das unidades hidrogeológicas. Estas são obtidas através de uma maior partição do terreno, baseada nos principais tipos litológicos existentes. Estas unidades podem ser obtidas intersectando as unidades de declive com um mapa litológico da área de estudo. A subdivisão hidrogeológica retém assim toda a informação típica de uma unidade de declive (i.e. baseada apenas nas condições de drenagem) e limita o problema de existir na mesma vertente duas ou mais litologias com competências diferentes (op. cit.).

As unidades topográficas são subdivisões de base vectorial obtidas através da divisão de uma bacia de drenagem ou uma única vertente, num conjunto de elementos de tamanho e forma irregulares. As unidades topográficas são um tipo particular de unidades de declive, pois as condições hidrogeológicas são tidas em conta na formação dos elementos. Devido à sua composição hidrológica, estas unidades são adequadas para a modelação de movimentos de terreno superficiais. As limitações da utilização destas unidades são as mesmas das das unidades de declive (op. cit.).

As unidades administrativas podem ser adoptadas para áreas de grande cobertura. De um modo geral, estas unidades não têm em conta as condições geomorfológicas, litológicas e hidrogeológicas do terreno, pelo que se tornam limitadas na avaliação da susceptibilidade (op. cit.).

2.2.2.2 Tipos de zonamento e objectivos das cartas de movimentos de terreno

O zonamento de movimentos de terreno pode ser efectuado para planeamentos a nível regional, local ou de sítio. Os resultados deste processo costumam ser apresentados sob a forma de cartas, das quais se distinguem cartas de inventariação, de susceptibilidade, de perigosidade e de risco de movimentos de terreno (Fell et al., 2008a).

As cartas de inventariação de movimentos de terreno são os formatos mais simples de cartas de movimentos de terreno pois são de natureza essencialmente factual e estão sujeitas a um certo grau

de interpretação (Guzzetti, 2005; AGS, 2007c). Cascini et al. (2005) referem que é nestas cartas que se concentram as maiores fontes de erro pois a interpretação da fotografia aérea pode ser bastante subjectiva, sobretudo a pequenas escalas.

As cartas de zonamento da susceptibilidade a movimentos de terreno envolvem a classificação por área ou volume e a distribuição espacial de situações de instabilidade de vertente, existentes ou potenciais, na área em estudo (AGS, 2007c; Fell et al., 2008a; Corominas & Mavrouli, 2011). Assim, estas cartas subdividem o terreno em zonas com diferentes probabilidades de iniciação de um certo tipo de movimento de terreno, com base em combinações de condições geológicas, topográficas e de uso do solo, entre outras (Corominas et al., 2013).

AGS (2007c) e Fell et al. (2008a) também referem que as cartas de zonamento da susceptibilidade podem incluir uma descrição da distância percorrida, da velocidade e da intensidade dos movimentos de vertente, existentes ou potenciais, e que, devido à inclusão do trajecto percorrido pelas massas instabilizadas, por vezes este zonamento deve ser estendido para além do limite da área em estudo. Segundo Corominas & Mavrouli (2011), a probabilidade de ocorrência de instabilidades de vertente deve ser indicada qualitativa (alta, moderada, baixa ou nula susceptibilidade) ou quantitativamente (e.g. densidade de ocorrências por quilómetro quadrado, área afectada por quilómetro quadrado, etc.).

As cartas de zonamento da perigosidade a movimentos de terreno são o resultado do zonamento da susceptibilidade com a inclusão da frequência estimada, em probabilidade anual, de potenciais instabilidades de vertente (AGS, 2007c; Fell et al., 2008a). Segundo os autores, estas devem considerar todos os movimentos de terreno que possam afectar a área em estudo, ou seja, os que se encontram acima da área estudada e que no decorrer do trajecto a possam afectar e os que se encontram abaixo e que podem atingir a área por retroactividade. Corominas & Mavrouli (2011) defendem que uma avaliação quantitativa completa da perigosidade deverá conter a probabilidade espacial, temporal, de área/volume e de distância percorrida pela massa instabilizada.

O zonamento da perigosidade define-se, segundo Van Westen et. al. (1997), como um processo comportando duas etapas distintas. Em primeiro lugar avalia-se a susceptibilidade a instabilidades de vertente num dado local, em que a susceptibilidade do terreno é expressa pela probabilidade que tal fenómeno possa ocorrer sob determinadas condições e/ou parâmetros. Depois é determinada a probabilidade de ocorrência de um evento com potencial desencadeador de instabilidades (e.g. tempestades e sismos). Os autores referem que o cálculo da probabilidade de instabilidades de vertente é mais difícil que para outros desastres pois não existe uma relação simples entre a magnitude de uma massa instabilizada e o período de retorno de um dado evento. Um outro problema é o facto de, por vezes, não existirem registos históricos que façam a relação entre as datas de ocorrência de instabilidades de vertente com as de eventos sísmicos ou de precipitação intensa.

Numa definição mais recente (AGS, 2007c; Fell et al., 2008a), a perigosidade pode ser avaliada pela frequência de um tipo particular de movimento de terreno e de um certo volume e/ou velocidade (1), ou pela frequência de movimentos de terreno com uma determinada intensidade em termos de energia cinética (2). Ou seja, a perigosidade pode ser expressa em função de um tipo particular de instabilidade

(1) ou em função de um certo valor, ou gama de valores, de intensidade (2), não importando o tipo de movimento. As medidas de intensidade são particularmente úteis em avaliações de quedas de blocos e fluxos de detritos.

Na definição original de Varnes (1984), a perigosidade apenas se refere à probabilidade de ocorrência de uma instabilidade de vertente para uma dada magnitude (i.e. em função do volume de massa deslocada). No entanto, a magnitude não é um bom descritor da perigosidade, pois não há uma correlação directa entre o volume de massa deslocada e o seu potencial destrutivo (Corominas et al., 2013).

As cartas de zonamento do risco a movimentos de terreno juntam o resultado das cartas de zonamento da perigosidade com a avaliação dos danos potenciais humanos (probabilidade anual de perdas humanas), danos materiais (probabilidade anual de perdas materiais) e elementos geoambientais para os elementos em risco (AGS, 2007c; Fell et al., 2008a).

No entanto, Guzzetti (2005) refere que o objectivo do zonamento do risco é substancialmente diferente do zonamento da susceptibilidade ou da perigosidade, pois estes últimos concentram-se no talude ou unidade de terreno onde o movimento de terreno possa ter início. O zonamento do risco tem como foco o elemento que pode sofrer danos aquando de um movimento de terreno. Assim, segundo aquele autor, o zonamento do risco é um conceito que não pode ser aplicado como para a susceptibilidade e a perigosidade pois o risco depende da vulnerabilidade de um dado elemento e não da sua localização numa determinada área.

No enquadramento da avaliação da susceptibilidade, perigosidade ou risco de movimentos de terreno e na gestão do território, as cartas de zonamento podem desempenhar diferentes funções, de entre as designadas por Fell et al. (2008a): informativas (*information*), de aptidão à ocupação (*advisory*), de limitação à ocupação (*statutory*) e de planos de pormenor (*design*). As cartas de aptidão à construção são cartas ditas indicativas e/ou orientadoras e as de limitação à ocupação são do tipo restritivo. Por seu lado, as cartas de planos de pormenor são utilizadas em projectos, normalmente a grande escala. Com base nas definições destas funções, Corominas & Mavrouli (2011) especificaram os objectivos de cada carta:

- As cartas de inventariação podem ser utilizadas para o zonamento da susceptibilidade e/ou como **informação** para gestores de planeamento e para o público em geral.
- As cartas de zonamento da susceptibilidade a movimentos de terreno podem ser utilizadas para a preparação de mapas de perigosidade e/ou, em combinação com elementos vulneráveis na área abrangida pela susceptibilidade, como **informação** para decisores e o público em geral. Também podem ser utilizadas para fins orientadores no zonamento de **aptidão à ocupação** onde os registos de incidentes permitem a avaliação do risco (em termos de probabilidade e número de fatalidades) nas áreas ameaçadas por movimentos de terreno com velocidades classificadas como rápidas a extremamente rápidas (Quadro 2.2).
- As cartas de zonamento da perigosidade a movimentos de terreno podem ser **informativas, de aptidão ou limitação à ocupação** de modo a proporcionar um controlo do desenvolvimento

de áreas ameaçadas. Estas representam a maneira mais eficiente e económica de se proceder à mitigação de perdas materiais e humanas.

- As cartas de zonamento do risco a movimentos de terreno podem ser usadas como cartas de **limitação à ocupação** e permitem a implementação de sistemas de alerta de modo a proteger a população ou no sentido de se obter uma visão global dos danos anuais esperados para os elementos em risco. Em termos de análise de custo-benefício, as cartas de risco também podem ser utilizadas em forma de **planos de pormenor** para a mitigação do risco em obras de controlo ou estabilização.

A Tabela 2.6, adaptada do quadro elaborado por AGS (2007c) e posteriormente referenciado por Fell et al. (2008a) e por Corominas & Mavrouli (2011), resume a recomendação da aplicabilidade do tipo de zonamento em função dos objectivos pretendidos e da escala do estudo. Os zonamentos aplicáveis em função da escala em estudo são descritos em 2.2.2.3.

Tabela 2.6 - Tipos de zonamento recomendados em função dos objectivos pretendidos e da escala. X – aplicável; (X) – pode ser aplicável (adaptado de AGS, 2007c)

Objectivo	Tipo de zonamento			
	Inventariação	Susceptibilidade	Perigosidade	Risco
Zonamento regional				
Informação	X	X		
Aptidão à ocupação	X	X	(X)	
Limitação à ocupação	Não recomendado			
Zonamento local				
Informação	X	X	X	(X)
Aptidão à ocupação	(X)	X	X	X
Limitação à ocupação		(X)	X	(X)
Zonamento de sítio				
Informação	Não recomendado			
Aptidão à ocupação	Não habitualmente utilizado			
Limitação à ocupação		(X)	X	X
Planos de pormenor		(X)	(X)	X

De modo a se poder atingir os objectivos pretendidos pelo zonamento, Corominas & Mavrouli (2011) consideram ser necessária, por parte dos responsáveis pela gestão do território, uma apreciação dos seguintes pontos:

- a) definição da tipologia e nível de zonamento;
- b) compreensão da existência de disponibilidade dos potenciais dados de entrada;
- c) avaliação das implicações na aquisição de novos dados tendo em conta o tempo disponível para tal, os custos associados e a representatividade da informação para o zonamento pretendido.

Considerando que o zonamento pode ser efectuado a diferentes níveis e escalas, é imperativo a preparação das cartas tendo em conta a escala apropriada, de modo a que se possa usufruir de uma optimização dos dados de entrada e dos métodos a ter em conta no processo de zonamento.

2.2.2.3 Níveis de zonamento e escalas de estudo

O zonamento pode ser efectuado a um dado nível consoante a qualidade dos dados de entrada, a complexidade das análises efectuadas e a resolução da cartografia. Deste modo distinguem-se três níveis de zonamento: preliminar, intermédio e avançado (AGS, 2007c).

De acordo com Corominas & Mavrouli (2011), estes níveis de zonamento podem ser correlacionados com as categorias de modelação, qualitativa ou quantitativa, dos movimentos de terreno, ou seja, modelação heurística (baseada no conhecimento/*know-how*), modelação estatística (baseada nos dados) e modelação determinística/probabilística (baseada em processos físicos). Os vários tipos de modelação e técnicas de análise são abordados no sub-capítulo 2.3. Aqueles autores propõem as seguintes definições para os diferentes níveis de zonamento:

- O zonamento de nível preliminar está associado a métodos onde a susceptibilidade, perigosidade e risco são avaliados por meios **heurísticos**, ou seja, por parecer de peritos. Os principais dados de entrada são o inventário dos movimentos de terreno e as suas características geomorfológicas.
- O zonamento de nível intermédio normalmente baseia-se em resultados de técnicas de tratamento de dados e em relações empíricas, cujos dados de saída são analisados em relação à ocorrência de instabilidades (dados do inventário de movimentos de terreno). Esta metodologia é do tipo **estatístico** pois requer um número elevado de dados de entrada, a maioria recolhida a partir de imagens e do modelo digital de elevação (MDE), e valida os resultados com o inventário de ocorrências. As leis que regem a instabilidade não costumam ser tidas directamente em consideração.
- O zonamento de nível avançado costuma ser efectuado com o auxílio de modelos **determinísticos**, de base física, para o cálculo de parâmetros quantitativos (e.g. probabilidade de rotura, factor de segurança (FS), distância percorrida pela massa instabilizada, etc.). Este nível de zonamento requer dados de entrada de elevada qualidade e os resultados obtidos podem ser apresentados em cartas a grande escala.

A Tabela 2.7 resume a recomendação efectuada por AGS (2007c) sobre a aplicabilidade dos níveis de zonamento em função dos objectivos pretendidos com o zonamento. Pode-se constatar que o aumento do grau de complexidade dos dados de entrada, de acordo com o nível de zonamento, permite estudos a escalas maiores.

Tabela 2.7 - Níveis recomendados de zonamento em função dos objectivos pretendidos. X – aplicável; (X) – pode ser aplicável (adaptado de AGS, 2007c)

Objectivo	Nível de zonamento		
	Preliminar	Intermédio	Avançado
Zonamento regional			
Informação	X		
Aptidão à ocupação	X	(X)	
Limitação à ocupação	Não recomendado		
Zonamento local			
Informação	X	(X)	
Aptidão à ocupação	X	X	X
Limitação à ocupação		X	X
Zonamento de sítio			
Informação	Não recomendado		
Aptidão à ocupação	Não habitualmente utilizado		
Limitação à ocupação		X	X
Planos de pormenor		(X)	X

O tipo e nível de detalhe do zonamento está directamente dependente da escala em que é efectuado o estudo pretendido. A escala de trabalho, por sua vez, depende do propósito para o qual este é efectuado e por outros factores tais como os dados de entrada disponíveis, os métodos a serem utilizados para a análise dos dados e o tipo de informação fornecida (i.e. qualitativa ou quantitativa). Em suma, para escalas de trabalho maiores, é exigido a utilização de métodos de análise de maior complexidade e dados de entrada contendo informação mais pormenorizada (e.g. características geotécnicas).

A Figura 2.13 demonstra a relação existente entre a complexidade dos modelos de análise e a escala permitida para o estudo da susceptibilidade a movimentos de terreno. De acordo com Glade & Crozier (2005), o desafio da criação de mapas de susceptibilidade prende-se na tentativa de obter um equilíbrio perfeito entre a dependência da escala e a complexidade dos modelos.

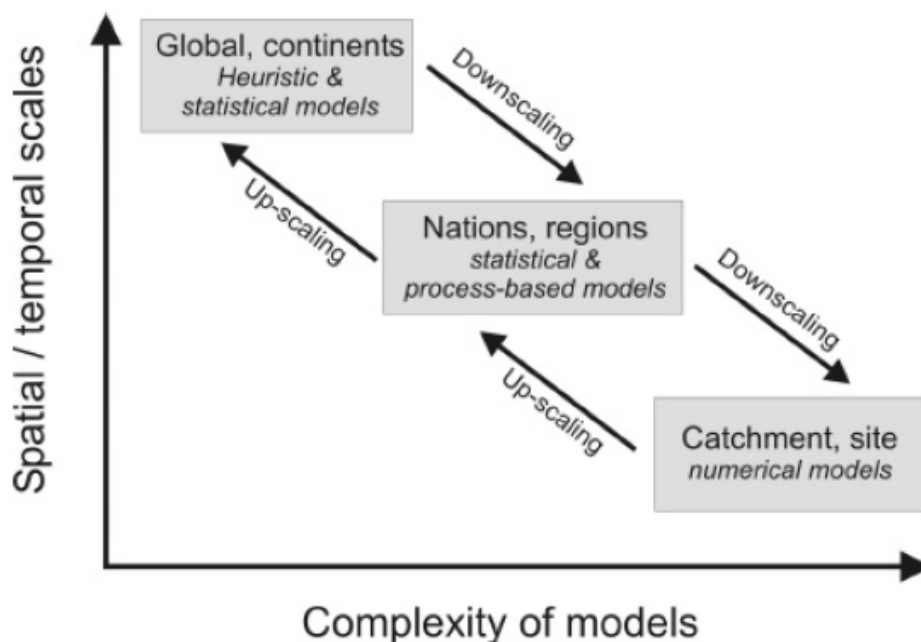


Figura 2.13 – Relação entre a escala e a complexidade dos modelos (retirado de Glade & Crozier, 2005)

Existem publicados diversos documentos com várias classificações de escala de trabalho, dependendo dos diferentes autores, mas encontram-se todas dentro da mesma ordem de grandeza. A Tabela 2.8 resume as classificações da escala de zonamento, com maior relevância, propostas recentemente.

Tabela 2.8 - Classificações de escala de zonamento propostas por diversos autores (adaptado de Fell et al., 2008a; Corominas & Mavrouli, 2011; Soeters & Van Westen, 1996; IAEG, 1976 apud Soeters & Van Westen, 1996)

Escola do zonamento	Nacional	Regional	Local	Sítio
Autor				
Fell et al. (2008a)	-	1:250 000 a 1:25 000	1:25 000 a 1:5 000	1:5 000 a 1:1 000
Corominas & Mavrouli (2011)	< 1:100 000	1:100 000 a 1:25 000	1:25 000 a 1:5 000	> 1:5 000
	Área típica de zonamento > 10 000 km ²	1 000 a 10 000 km ²	10 a 1 000 km ²	Alguns hectares a dezenas de km ²
Van Westen & Soeters (1996)	-	1:100 000 a 1:25 000	1:25 000 a 1:10 000	> 1:10 000
IAEG (1976)	< 1:1 000 000	1:500 000 a 1:100 000	1:50 000 a 1:25 000	1:15 000 a 1:5 000

Corominas & Mavrouli (2011) defendem que, de um modo geral, o zonamento da susceptibilidade a movimentos de terreno a escala nacional (< 1:100 000) deve ser efectuado com recurso a métodos de análise do tipo heurístico. Por sua vez, o zonamento a escala regional (1:100 000 a 1:25 000) já

pressupõe um nível mais avançado de zonamento, no entanto, os métodos de análise do tipo estatístico apenas podem ser empregues quando os dados apropriados se encontram disponíveis. Para o zonamento a nível local (1:25 000 a 1:5 000), todos os níveis de zonamento podem ser desenvolvidos, dependendo do objectivo a que o estudo se propõe (Tabela 2.6). Os autores referem que, a esta escala, os métodos de análise estatísticos ou determinísticos podem ser empregues desde que haja garantia da qualidade dos dados de entrada. Um zonamento a escala de sítio (> 1:5 000) requer um zonamento de nível mais avançado, ou seja, com dados de entrada de elevada qualidade e pormenorização, podendo-se assim proceder à análise da susceptibilidade a movimentos de terreno por via de métodos determinísticos.

A escala de estudo também define o tipo de zonamento que pode ser efectuado, como pode ser observado na Tabela 2.6. O aumento da escala requer e/ou providencia dados de entrada de elevado pormenor, o que por sua vez permite uma maior complexidade no tipo de zonamento, sendo a inventariação de movimentos de terreno o zonamento menos complexo e o zonamento do risco o de maior complexidade. Corominas et al. (2013) exemplificam a relação da escala com o tipo de zonamento com a premissa que as cartas produzidas a escala nacional e/ou regional não possibilitam o zonamento de instabilidades de vertente individuais. Assim, os movimentos de terreno devem ser tratados colectivamente, com recurso a análises do tipo heurístico ou estatístico, se existirem os dados de entrada com qualidade suficiente. A análise do tipo determinístico fica assim impossibilitada de ser empregue pois esta rege-se pela identificação de instabilidades de vertente individuais.

Corominas & Mavrouli (2011) referem que, a uma escala nacional, podem ser produzidas cartas de inventariação ou cartas de susceptibilidade a movimentos de terreno com o propósito de informar as autoridades competentes ou o público em geral. A uma escala regional já podem ser produzidas cartas de perigosidade a movimentos de terreno de nível preliminar e para áreas locais. A esta escala, o zonamento da susceptibilidade pode ser efectuado, por exemplo, no âmbito do planeamento regional ou para projectos de engenharia. Soeters & Van Westen (1996) referem que para a escala regional, a cartografia de zonamento é efectuada sobretudo para o planeamento de fases preliminares de projectos de desenvolvimento regional ou para engenheiros, com vista a projectos de engenharia de grande envergadura, que queiram avaliar possíveis constrangimentos devido à instabilidade do terreno. As cartas produzidas a escala regional também podem indicar áreas nas quais os movimentos de terreno apresentam a possibilidade de ser uma limitação ao desenvolvimento, rural ou urbano, de sistemas de transporte.

Para uma escala local, podem ser efectuadas análises, qualitativas e possivelmente quantitativas, da perigosidade a movimentos de terreno ou do risco. Corominas & Mavrouli (2011) dão como exemplos possíveis, a esta escala, zonamentos de nível intermédio a avançado para a avaliação da perigosidade a movimentos de terreno, no âmbito do planeamento regional ou zonamentos de nível preliminar a avançado de avaliação do risco, para inclusão em estudos de engenharia (e.g. infra-estruturas de grande dimensão). Por último, as cartas produzidas à escala de sítio podem ter como propósito a avaliação quantitativa do risco, incluída em fase de projecto de obras de engenharia.

2.2.2.4 Incerteza associada ao zonamento

De acordo com Corominas et al. (2013), a avaliação ou estimação da incerteza, robustez ou fiabilidade das cartas produzidas, no âmbito do zonamento de movimentos de terreno pode ser uma tarefa desafiadora. Isto acontece porque as diferentes cartas produzidas (i.e. avaliação da susceptibilidade, perigosidade e risco) predizem eventos futuros cuja melhor avaliação do método utilizado limita-se ao “esperar para ver”, com o comportamento do zonamento a ser testado com eventos que acontecem após a produção das cartas. Esta não é uma solução prática embora possa providenciar um grau qualitativo de confiança no zonamento apresentado. O comportamento de um modelo indica se a carta de zonamento resultante faz uma correcta distinção entre áreas potencialmente livres de movimentos de terreno e as propícias a tal.

Segundo Corominas & Mavrouli (2011), as potenciais fontes de erro no processo de zonamento são:

- As cartas topográficas, pois os elementos de fronteira do zonamento devem ser definidos com uma precisão adequada;
- Os inventários de movimentos de terreno que representam, em geral, a maior fonte de erro no processo de zonamento da susceptibilidade a instabilidades de vertente. Os erros relacionam-se com a subjectividade da interpretação da fotografia aérea, a cobertura vegetal na zona a ser estudada, o desaparecimento de movimentos superficiais, entre outros;
- As incertezas do modelo, ou seja, as limitações intrínsecas de alguns métodos determinísticos e estatísticos usados na avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno. Mais especificamente, os métodos estatísticos para a determinação de zonas propensas a rotura necessitam de dados de entrada apropriados para a sua determinação e posterior validação e calibração do modelo. Os métodos determinísticos oferecem melhores resultados com o aumento da complexidade e/ou detalhe dos dados de entrada (e.g. propriedades geotécnicas do solo), mas ainda assim, não têm em conta os comportamentos geomecânicos complexos que ocorrem no talude durante e após a rotura.

Para contornar a questão de testar o comportamento de um modelo por confirmação com eventos futuros, utilizam-se geralmente, como referência, as cartas de inventariação de movimentos de terreno. No entanto, a maioria destas cartas contém graus elevados de incerteza (Corominas et al., 2013). Outro método de avaliação do comportamento de um modelo é a comparação de cartas de zonamento da mesma área criadas por diferentes métodos de análise. Neste trabalho é posto em prática este método de avaliação do comportamento do modelo pois a área em estudo não possui uma inventariação consistente (física e temporal) dos movimentos de terreno que já ocorreram. A avaliação do comportamento dos modelos usados neste trabalho é abordada no capítulo 5.

O teste de comportamento do modelo utilizado é um problema que envolve vários critérios, entre eles (op. cit.):

- A adequabilidade (conceptual e matemática) do modelo escolhido para a descrição do sistema;

- A robustez do modelo face a pequenas mudanças nos valores dos dados de entrada, avaliada com uma análise de sensibilidade;
- A exactidão do modelo na previsão dos dados observados.

Podem ser definidos dois tipos de incertezas; a) as aleatórias (ou de tipo 1), motivadas pela aleatoriedade intrínseca de um dado fenómeno, ou seja, inerentes à variabilidade natural (e.g. variação espacial de um parâmetro geotécnico dentro da mesma camada litológica), e b) as epistémicas ou estatísticas do modelo (ou de tipo 2), resultantes da falta de conhecimentos ou dados. A incerteza aleatória é inerente à heterogeneidade presente em praticamente todos os parâmetros avaliados. Por seu lado, a incerteza epistémica é composta essencialmente por incertezas de medida (derivadas do equipamento ou erros de procedimento), de estimação estatística (derivadas de um número limitado de amostras) e de processos de transformação (derivadas das aproximações e simplificações inerentes aos modelos) (Corominas & Mavrouli, 2011; Narasimhan et al., 2011; Corominas et al., 2013).

A distinção entre os tipos de incerteza é útil no desenvolvimento de modelos robustos e fiáveis e para a identificação de fontes de incerteza que podem ser reduzidas (Der Kiureghian & Ditlevsen, 2007). Ao contrário das incertezas aleatórias, as incertezas epistémicas podem ser reduzidas pela recolha de mais dados ou pela refinação dos modelos através de, por exemplo, a introdução de variáveis auxiliares que definam correlações claras.

O termo robustez caracteriza a variabilidade na precisão da classificação devido a perturbações no processo de modelação. Por vezes, as análises de robustez apenas se focam nas perturbações no comportamento do modelo devido a erros nos parâmetros dos dados de entrada. Neste sentido procede-se a uma análise de sensibilidade, usada para identificar os parâmetros-chave que mais influenciam os dados de saída (e.g. análise de sensibilidade global) e para dar ênfase aos parâmetros que exercem um maior efeito num dado de saída mas não na sua incerteza (e.g. análise de sensibilidade local) (Corominas et al., 2013).

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO

Uma carta de susceptibilidade a movimentos de terreno subdivide o terreno em zonas com diferentes probabilidades de ocorrer um certo tipo de movimento de vertente (e.g. queda, escorregamento, tombamento, etc.).

Como referido no sub-capítulo 2.2, a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno pode ser considerada como um passo inicial para a avaliação da perigosidade e do risco, mas as cartas produzidas também podem ser um produto final quando usadas em estudos de planeamento urbano e avaliações de impacte ambiental. Tal acontece sobretudo quando a escala em estudo é pequena ou em situações em que a informação disponível sobre a ocorrência de eventos passados é insuficiente (Corominas et al., 2013).

Os métodos utilizados na análise da susceptibilidade a movimentos de terreno são comumente baseados no pressuposto de que as condições passadas são indicativas de condições futuras. Assim, nas áreas onde ocorreram instabilidades no passado, existe a possibilidade de ocorrerem instabilidades no futuro, uma vez que as condições e o contexto ambiental (e.g. topografia, litologia, geomorfologia e uso do solo) são os mesmos (Guzzetti, 2005; Corominas & Mavrouli, 2011; Corominas et al., 2013). No entanto, deve ser tido em conta que, por vezes, as condições ambientais podem sofrer alterações, fazendo com que os resultados obtidos no passado deixem de ser uma garantia para o futuro. A informação deve então ser adaptada quando existem alterações a nível dos factores condicionantes e/ou desencadeantes, como por exemplo os antrópicos ou os associados a alterações climáticas (Corominas & Mavrouli, 2011).

2.3.1 Métodos existentes

Os métodos existentes para a análise da susceptibilidade a movimentos de terreno (Tabela 2.9) podem ser classificados em quatro classes distintas: métodos de inventariação (*inventory-based*), métodos heurísticos (*knowledge-driven*), métodos estatísticos (*data-driven*) e métodos determinísticos (*physically-based*) (Corominas et al., 2013; Soeters & Van Westen, 1996; Corominas & Mavrouli, 2011; AGS, 2007c).

Os métodos também podem ser classificados como qualitativos (inventariação e heurísticos) ou quantitativos (estatísticos e determinísticos). Os métodos qualitativos podem ser aplicados com sucesso na avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno em certas zonas, no entanto, um estudo quantitativo permite uma avaliação mais objectiva (Hervás & Delattre, 2010). Corominas & Mavrouli (2011) definem que uma avaliação é qualitativa ou quantitativa dependendo do uso de a) procedimentos analíticos suportados por simulação computacional, b) indicadores ponderados e opinião especializada ou c) uma combinação dos dois tipos de procedimento.

Tabela 2.9 - Técnicas de análise para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno (Soeters & Van Westen, 1996)

Tipo de análise	Técnica	Características
Inventariação	Análise da distribuição	Análise da distribuição e classificação de movimentos de terreno
	Análise da actividade	Análise temporal das alterações nos padrões dos movimentos de terreno
	Análise da densidade	Calcula a densidade de movimentos de terreno em unidades de terreno
Heurística	Análise geomorfológica	Utiliza a opinião de um especialista
	Combinação qualitativa	Utiliza valores ponderados por um especialista
Estatística	Análise estatística bivariada	Calcula a importância da combinação de factores
	Análise estatística multivariada	Calcula a fórmula de previsão a partir de uma matriz de dados
Determinística	Análise do factor de segurança	Aplica modelos hidrológicos e de estabilidade de taludes

Os métodos existentes podem ainda ser divididos em técnicas de avaliação absoluta ou relativa. Dos vários métodos existentes para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno destacam-se as técnicas de avaliação absoluta, baseadas nas características físicas do terreno, e as técnicas de avaliação relativa, baseadas na distribuição das instabilidades de vertente e no relacionamento destas com os factores condicionantes e desencadeantes (Garcia & Zêzere, 2003 apud Meneses, 2011).

Os métodos de inventariação são requeridos como um passo preliminar para os outros métodos pois as cartas obtidas (e.g. cartas de distribuição de instabilidades com base em fotointerpretação, cartas de inventariação de ocorrências com base em registos históricos, etc.) servem de input e/ou validação para os demais métodos (Corominas et al., 2013). Os métodos de base estatística, ao contrário dos de base empírica (heurísticos) e de base física (determinísticos), utilizam estas cartas como dados de entrada para a análise da susceptibilidade.

Nos métodos heurísticos, as cartas de susceptibilidade podem ser produzidas por via de métodos directos ou indirectos. Nos métodos heurísticos directos, as cartas são preparadas directamente no terreno por um especialista ou criadas em gabinete como cartas derivadas de cartas geomorfológicas. Existe assim uma interpretação da susceptibilidade directamente no terreno com base nos fenómenos observados e no contexto geológico-geomorfológico. Os métodos heurísticos indirectos utilizam SIG como ferramentas para a preparação de uma carta final sem recurso a modelação extensiva. Estes métodos também podem ser aplicados indirectamente, com a utilização de SIG, na combinação de diversas cartas de factores que possam ser consideradas relevantes na ocorrência de instabilidades. Assim, com base na experiência e conhecimento sobre os factores causais de instabilidades em dada região, o especialista pode atribuir diferentes pesos a certas combinações de factores (op. cit.).

Nos métodos estatísticos para a avaliação da susceptibilidade, as combinações de factores que desencadearam instabilidades no passado são avaliadas estatisticamente. São assim efectuadas previsões quantitativas para zonas, com condições geológicas, topográficas e de uso do solo similares, que actualmente não estão afectadas por instabilidades. Estes métodos utilizam dados de ocorrências de instabilidade passadas para a obtenção de informação sobre a importância relativa das cartas de factores. Nesta abordagem são geralmente utilizados três tipos de análise: análise bivariada (e.g. método do valor informativo, método do *weights of evidence*), análise multivariada (e.g. *discriminant analysis*, regressão logística) e análise de aprendizagem activa (e.g. redes neuronais artificiais) (op. cit.). Entre os métodos de análise estatística bivariada destaca-se o método do valor informativo aplicado nos trabalhos de Pereira et al. (2012) e Zêzere (2002), entre outros.

Por fim, os métodos determinísticos para a avaliação da susceptibilidade são baseados na modelação de processos de rotura do talude. Como referido no subcapítulo 2.2, estes métodos apenas são aplicáveis em áreas de maior dimensão quando as condições geológicas e geomorfológicas são relativamente homogéneas e quando os tipos de movimentos existentes no terreno são simples. A maioria destes métodos, quando aplicados a escala local ou de sítio, utilizam o modelo de estabilidade de talude infinito, impossibilitando assim a análise de instabilidades profundas (Corominas et al., 2013).

Os diversos autores defendem que, na avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno, existe um elo de ligação entre a escala de análise, o tipo de método a ser utilizado e a possibilidade de obtenção dos dados de entrada necessários, como descrito em 2.2.2. Na selecção do método analítico mais apropriado, deve ser tida em consideração a disponibilidade dos dados de entrada e a escala da zona em estudo. Por exemplo, uma análise a pequena escala por via de modelação determinística e com dados geotécnicos insuficientes não é recomendada. Tal resulta numa simplificação excessiva e com margens de erro demasiado elevadas.

2.3.2 Métodos determinísticos

Os métodos determinísticos baseiam-se na modelação de processos inerentes aos movimentos de terreno, com recurso a modelos de estabilidade de taludes.

A maioria dos modelos de base física que são aplicados a escala local usam o modelo de estabilidade de talude infinito e são assim apenas aplicáveis na modelação de escorregamentos superficiais do tipo translacional. Estes podem ser subdivididos em modelos estáticos, sem componente temporal, e em modelos dinâmicos, capazes de avançar no tempo usando regras de causa e efeito para simular variações temporais no terreno (Corominas & Mavrouli, 2011).

Os modelos determinísticos para instabilidades superficiais têm em conta a resposta do regime de escoamento transiente dos taludes às precipitações e, por vezes, às acelerações sísmicas. A componente hidrológica transiente é assim incorporada assumindo um fluxo subsuperficial paralelo à superfície em regime permanente como função da área de contribuição (modelos de regime permanente) ou por avaliação dinâmica da resposta do nível freático à precipitação (modelos dinâmicos). Os modelos dinâmicos de avaliação da susceptibilidade aos movimentos de terreno contêm assim uma variação espacial e temporal da iniciação de instabilidades, sendo então também aplicáveis à avaliação da perigosidade (op. cit.).

As cartas resultantes da aplicação dos modelos determinísticos mostram o factor de segurança (FS), ou um índice de estabilidade, para cada pixel e para um dado cenário. Os modelos de base física também são aplicáveis em áreas com inventariação incompleta de movimentos de terreno pois não dependem desta para a análise da susceptibilidade (op. cit.).

Os parâmetros usados nestes modelos são geralmente mensuráveis e são tidos como constantes para um determinado momento temporal e espacialmente. Os resultados são mais concretos e consistentes que os obtidos por vias da modelação heurística ou estatística. Estes modelos têm uma maior capacidade de previsão e são os mais indicados para a avaliação quantitativa da influência de parâmetros individuais que contribuem para a iniciação de instabilizações superficiais. (op. cit.).

No entanto, segundo Corominas & Mavrouli (2011), os métodos de base física podem ser mais morosos pois necessitam de mais recursos e dados de entrada mais complexos. A parametrização destes modelos também pode ser complicada, sobretudo na distribuição espacial da profundidade do solo,

que tem um peso considerável no processo de instabilização. Outra desvantagem é a simplificação exagerada inerente às técnicas de análise, havendo assim necessidade de elevadas quantidades de dados de entrada fiáveis. Também apenas podem ser aplicados a grandes áreas se as condições geológicas e geomorfológicas forem relativamente homogêneas e se os movimentos de terreno forem de tipologia simples.

A Tabela 2.10 mostra os métodos mais recomendados para a avaliação determinística da susceptibilidade e os programas associados. Destacam-se assim os métodos de equilíbrio limite de base SIG, a análise cinemática de movimentos de terreno em taludes rochosos, os métodos de equilíbrio limite a 2D e 3D e por fim as técnicas de modelação numérica.

Tabela 2.10 - Métodos recomendados para a avaliação determinística da susceptibilidade a movimentos de terreno (Corominas & Mavrouli, 2011)

Tipo	Método
Métodos de equilíbrio limite de base SIG	Modelação estática de talude infinito (SINMAP, SHALSTAB)
	Modelação dinâmica de talude infinito com precipitação como factor desencadeante (TRIGRS, STARWARS + PROBSTAB)
	Modelação de talude infinito sob acção de aceleração sísmica (Newmark)
Análise cinemática de taludes rochosos	Análise de descontinuidades, projecção estereográfica (SLOPEMAP, DIPS)
Métodos de equilíbrio limite 2D	Métodos de equilíbrio limite 2D com fluxo subterrâneo e análise de tensões (SLOPE/W, SLIDE, GALENA, GSLOPE)
Métodos de equilíbrio limite 3D	Análise de estabilidade de taludes 3D (CLARA-W, TSLOPE3)
Modelação numérica	Modelação contínua - e.g. elementos finitos (FLAC3D, VISAGE)
	Modelação descontínua - e.g. elementos discretos (UDEC)

2.4 DADOS DE ENTRADA

O processo de instabilidade de uma vertente é regido por uma rede complexa de parâmetros de terreno interrelacionados entre si, tais como, a litologia e as condições estruturais das rochas, o estado de alteração e o contacto entre camadas, as propriedades dos solos, o gradiente da vertente e a sua forma, as condições hidrológicas, a vegetação, o uso do solo e, por fim, a actividade antrópica com influência nas condições da vertente (Van Westen et al., 1997). Estes parâmetros são controladores da ocorrência de instabilidades e compõem os dados de entrada necessários para a avaliação da susceptibilidade, perigosidade ou risco a movimentos de terreno.

Os dados de entrada requeridos para uma análise da susceptibilidade (ou perigosidade e risco) a instabilidades de vertente dependem de uma série de factores, tais como, o objectivo do estudo, a

escala, o tipo e o nível de zonamento, o tipo de mecanismo de rotura, entre outros. Estes parâmetros podem ser subdivididos em 4 grupos distintos (Corominas et al., 2013; Corominas & Mavrouli, 2011; Soeters & Van Westen, 1996; Van Westen et al., 2008):

- Inventariação de movimentos de terreno;
- Parâmetros geoambientais (condicionantes);
- Parâmetros iniciadores do movimento (desencadeantes);
- Elementos em risco.

Neste trabalho apenas se propõe estudar a análise da susceptibilidade a instabilidades de vertente, pelo que os parâmetros que compõem o grupo de elementos em risco não são apresentados em pormenor no seguimento deste subcapítulo.

Corominas et al. (2013) referem que, do conjunto de grupos apresentados, o grupo relacionado com a inventariação de movimentos de terreno é o mais importante, pois compõe os parâmetros que fornecem informação sobre a localização de instabilidades antigas, os seus mecanismos de rotura, os factores que causaram as roturas, a frequência das ocorrências, entre outros. No entanto, e como é referido em 4.1.2, nem sempre as inventariações das instabilidades de vertente ocorridas existem, pelo que certos parâmetros devem ser obtidos empiricamente ou por estudos geotécnicos.

É referido, no estudo efectuado por Corominas & Mavrouli (2010), que, independentemente da elevada variabilidade de técnicas e metodologias existente entre os diferentes países na produção de cartas de susceptibilidade, certos dados de entrada são sempre utilizados (i.e. dados geológicos, geomorfológicos e de uso do solo). As técnicas utilizadas na obtenção dos dados de entrada para a produção de inventariação de movimentos de terreno e cartas de susceptibilidade variam bastante, havendo assim vários níveis de qualidade e quantidade de dados disponíveis.

Os grupos dos factores geoambientais e dos iniciadores do movimento são os que apresentam um maior número de parâmetros. Os parâmetros geoambientais são factores intrínsecos, ou predisponentes, que contribuem para a instabilidade da vertente. Estes compõem um conjunto de factores com capacidade prevista para exercer algum efeito na ocorrência de movimentos de terreno e podem ser utilizados como factores causais na previsão de futuras instabilidades (Van Westen et al., 2008). Por seu lado, os factores iniciadores do movimento são os que realmente desencadeiam o evento.

Van Westen et al. (2008) propõem uma compilação dos dados de entrada básicos, para a análise da susceptibilidade e/ou perigosidade a movimentos de terreno, consoante os grupos descritos acima, à excepção do grupo referente aos elementos em risco (Tabela 2.11). Cada grupo de dados é subdividido em *data layers*, ou seja, camadas ou conjuntos de informação de um dado tema segundo a terminologia ArcSIG (Brito, n.d.).

Os dados de entrada básicos podem ainda ser subdivididos em duas categorias: dados dinâmicos (e.g. precipitação atmosférica, temperatura, hidrogeologia, aceleração sísmica, etc.) e relativamente estáticos (e.g. litologia, geomorfologia, etc.). Os dados dinâmicos necessitam de uma actualização

periódica que pode variar de horas e dias (e.g. dados meteorológicos e a sua influência na hidrogeologia) a meses e anos (e.g. uso do solo) (Van Westen et al., 2008).

Tabela 2.11 - Representação esquemática do conjunto de dados de base para a análise da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno (adaptado de Van Westen et al., 2008)

Dados		Escala				Modelos de perigosidade				
Grupo	Data layer	Detecção remota	Nacional	Regional	Local	Sítio	Heurístico	Estatístico	Determinístico	Probabilístico
Inventariação de instabilidades										
	Inventariação	E	C	E	E	E	C	E	E	E
	Actividade	E	M	C	C	C	E	C	C	C
	Monitorização	M	M	M	M	C	-	-	E	E
Parâmetros geoambientais										
	MDT	E	E	C	C	C	E	C	C	C
	Declive (ângulo, aspecto, etc.)	E	B	E	E	E	E	E	E	E
	Descompressão do maciço	E	E	M	B	B	E	B	-	-
	Acumulação de fluxo	E	B	M	E	E	B	M	E	E
	Litologia	M	E	E	E	E	E	E	E	E
	Estrutura	M	E	E	E	E	E	E	E	E
	Falhas	M	E	E	E	E	E	E	-	-
	Tipo de solo	M	M	E	C	C	E	E	C	E
	Profundidade do solo	-	-	B	C	C	-	-	C	E
	Hidrogeologia	-	-	-	C	C	-	-	C	E
	Unidades geomorfológicas principais	E	C	E	M	B	C	M	B	B
	Unidades geomorfológicas detalhadas	E	E	E	E	B	E	E	M	B
	Tipos de uso do solo	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	Modificações no uso do solo	E	M	E	E	C	E	E	E	C
Parâmetros iniciadores do movimento										
	Precipitação	B	M	M	C	C	E	E	C	C
	Temperatura / evapotranspiração	M	-	-	M	E	-	-	E	B
	Inventariação sismos	-	M	M	E	C	-	-	-	C
	Aceleração sísmica	B	B	M	E	E	E	E	E	B

A coluna Detecção Remota indica a utilidade desta na aquisição dos dados. Escala: indica a importância do tipo de dados e a praticabilidade de obtenção dos dados às diferentes escalas. Modelos de perigosidade: indica a importância do conjunto de dados para cada tipo de método de análise da perigosidade. (C = crucial, E = elevada, M = média, B = baixa).

A indicação da importância de cada conjunto de dados para dado tipo de análise da perigosidade a movimentos de terreno na Tabela 2.11 (i.e. heurístico, estatístico, determinístico e probabilístico) também pode ser interpretado similarmente para a análise da susceptibilidade, pois os dados de entrada são os mesmos, sendo que na análise da perigosidade é incluída a probabilidade temporal para além da espacial.

De acordo com a Tabela 2.11, de um modo geral, existe uma maior ênfase na aquisição de dados por cartografia de campo (inventariação de instabilidades), medições *in situ* e ensaios de laboratório. A detecção remota adquire assim uma importância secundária, no entanto, esta torna-se particularmente útil quando não são conhecidos os dados referentes à profundidade do solo e à situação hidrogeológica do talude. Por outro lado, a detecção remota apresenta-se como uma fonte de informação fulcral para certos parâmetros tais como a inventariação de instabilidades, MDT e uso do solo (Van Westen et al., 2008).

2.4.1 Fonte dos dados de entrada

Para a consideração dos factores controladores da instabilidade de vertentes de modo a se poder proceder a uma análise da susceptibilidade, estes devem ser apresentados sob a forma de mapas (Corominas et al., 2013). Assim, devem ser conhecidas as diversas fontes de obtenção dos parâmetros controladores (i.e. dados de entrada) para uma optimização do estudo.

A Tabela 2.12, adaptada de Corominas et al. (2013), oferece uma visão geral das várias fontes de dados de entrada, com a indicação dos principais tipos de dados, as suas características, o método usado para a sua obtenção e a importância dos tipos de mecanismos de movimento de terrenos considerados (superficial e profundo). De acordo com aqueles autores, as fontes dos dados de entrada estão divididos, de acordo com o modo como estes são recolhidos, nos seguintes grupos: ensaios de laboratório, medições *in situ*, redes de monitorização, cartografia de campo, estudos de arquivo e detecção remota. Os dados apresentados na Tabela 2.12 não referem os movimentos de terreno associados a maciços rochosos, pois estes não são relevantes para o presente trabalho.

Tabela 2.12 - Fontes dos dados de entrada e a sua relevância na análise quantitativa da susceptibilidade a movimentos de terreno para diferentes mecanismos (adaptado de Corominas et al., 2013)

Fonte principal	Grupo de dados	Exemplos	Escala				Relevância	
			N	R	L	S	S	P
Ensaio de laboratório								
	Prop. do solo	Distribuição granulométrica, resistência ao corte, limites de Atterberg, minerais argilosos	x	x	o	●	C	E
	Prop. da vegetação	Coesão das raízes, evapotranspiração	x	x	o	●	E	M
	Datação	Carbono 14	o	o	o	●	B	E
Medições <i>in situ</i>								

Idade da instabilidade	Dendrocronologia, varvas	o	o	o	•	M	E
Profundidade do solo	Sondagens, poços, trincheiras	x	x	o	•	C	M
Geofísica	Refracção sísmica, resistividade eléctrica	x	x	o	•	M	E
Caract. do solo	SPT, CPT	x	x	o	•	C	M
Caract. hidrogeológicas	Capacidade de infiltração, variação do nível freático, pressão intersticial	x	x	o	•	C	C
Caract. vegetação	Profundidade das raízes, densidade, variedade de espécies	x	x	o	•	E	B
Redes de monitorização							
Deslocamentos	Varrimento laser, GPS, teodolitos, inclinómetros	x	x	o	•	E	E
Água subterrânea	Piezómetros	x	x	o	•	C	C
Dados meteorológicos	Precipitação, temperatura, humidade	•	•	•	•	E	E
Dados sísmicos	Estações sísmicas	•	•	•	•	E	E
Cartografia de campo							
Inventariação	Tipo, idade, velocidade do movimento, estado de actividade, área, volume, causas, desenvolvimento	o	•	•	•	C	C
Geomorfologia	Caracterização de estruturas, processos e materiais de superfície	o	o	•	•	E	E
Tipo de solo	Textura, classificação e reconversão para classificação de engenharia	o	o	•	•	C	E
Litologia	Cartografia litológica, zonas de alteração, formações	o	o	•	•	E	E
Geol. estrutural	Orientação e inclinação das camadas, descontinuidades, reconstrução estratigráfica e estrutural	o	o	•	•	B	E
Vegetação	Tipo, densidade	o	o	•	•	E	M
Uso do solo	Tipo, vegetação por tipo de uso do solo	o	o	•	•	E	E
Estudo de arquivo							
Eventos antigos	Informação histórica da localização, data de ocorrência, mecanismo de iniciação, tamanho, volume, desenvolvimento	o	o	•	•	E	C
Dados meteorológicos	Precipitação (contínua ou diária), temperatura, humidade	•	•	•	•	E	E
Mudanças uso do solo	Cartas do uso do solo para diferentes períodos	•	•	•	•	E	E
MDT	Mapas topográficos com linhas de contorno, MDT de catálogos existentes	•	•	•	•	E	E
Cartas temáticas	Geológica, geomorfológica, rede de drenagem, outras	•	•	•	•	E	E
Detecção remota							

Fotografias aéreas e imagens de satélite	Foto-interpretação para cartografia de movimentos de terreno, geomorfologia, falhas, uso do solo	○	●	●	●	C	C
Imagem multi-espectral	Métodos de classificação de imagens para cartografia de movimentos de terreno, uso do solo, índice de vegetação	●	●	●	●	E	M
Dados de MDT	LiDAR, InSAR, estereofotogrametria aérea	●	●	●	●	C	C

Tipos de instabilidade: S (superficial) e P (profundo). A relevância dos dados é indicada por C (crucial), E (elevada importância), M (importância moderada) e B (baixa importância). Escala: N (nacional), R (regional), L (local) e S (sítio). O potencial para a recolha da informação a diferentes escalas é indicado por ● = possível, ○ = difícil, × = não possível.

2.4.2 Parâmetros geoambientais e iniciadores do movimento

Os parâmetros geoambientais (i.e. condicionantes) e os iniciadores do movimento (i.e. desencadeantes) compõem dois dos blocos de informação necessários para a análise da susceptibilidade a movimentos de terreno.

2.4.2.1 Parâmetros geoambientais

De acordo com Van Westen et al. (2008), a selecção dos parâmetros geoambientais para a análise da susceptibilidade prende-se sobretudo com a técnica de análise a ser utilizada, o tipo de instabilidade, o tipo de terreno e a disponibilidade dos recursos e dados existentes. Aqueles autores também defendem que devem ser utilizadas diferentes combinações de parâmetros geoambientais de forma a se poder criar diferentes cartas de susceptibilidade para cada tipo de mecanismo de rotura.

A Tabela 2.13 fornece detalhes sobre a relevância dos parâmetros geoambientais na avaliação da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno, de acordo com as escalas de análise. Como é referenciado no subcapítulo 2.2, as escalas de estudo relacionam-se com as diferentes técnicas de análise existentes (heurística, estatística e determinística). Assim, a uma escala pequena (e.g. nacional ou regional) deve ser utilizada uma técnica do tipo heurístico, e analogamente, para escalas maiores (e.g. de sítio) deve ser privilegiada a utilização de técnicas do tipo determinístico. Logo, pela observação da Tabela 2.13, é perceptível a relevância de alguns conjuntos de dados para cada técnica de análise, embora algumas partilhem a mesma informação tal como a inclinação do talude e o tipo de solo e de uso do solo.

Tabela 2.13 - Sumário dos parâmetros geoambientais e a sua relevância na avaliação da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno em solos (adaptado de Van Westen et al., 2008)

Grupo	Data layer	Relevância para análise da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno	Escala			
			N	R	L	S
MDT						
	Gradiente do talude	Factor mais importante em movimentos gravitacionais	B	E	E	E
	Direcção do talude	Reflecte diferenças na vegetação e teor em água do solo	E	E	E	E
	Comprimento e curvatura do talude	Indicador da hidrogeologia do talude	M	E	E	E
	Direcção de fluxo	Usado na modelação hidrogeológica	B	M	E	E
	Acumulação de fluxo	Usado na modelação hidrogeológica	B	M	E	E
	Descompressão do maciço	Indicador do tipo de terreno em pequena escala	E	M	B	B
	Densidade de drenagem	Indicador do tipo de terreno em pequena escala	E	M	B	B
Solos						
	Tipos de solos	Tipos de solos de engenharia, baseados em classificações genéticas ou geotécnicas	M	E	E	E
	Profundidade do solo	Profundidade baseada em logs de sondagem ou métodos geofísicos	B	M	E	E
	Prop. geotécnicas	Distribuição granulométrica, coesão, ângulo de atrito	B	M	E	E
	Prop. hidrogeológicas	Porosidade, condutividade saturada	B	M	E	E
	Falhas	Distância de falhas activas ou largura de zonas de falha	E	E	E	E
Hidrogeologia						
	Nível freático	Variação espaço-temporal do nível freático	B	B	M	E
	Teor em água	Variação espaço-temporal do teor em água	B	B	M	E
	Componentes hidrogeológicas	Evapotranspiração, infiltração, percolação	M	E	E	E
	Rede de drenagem	Zonas de influência	E	E	E	B
Geomorfologia						
	Unidades fisiográficas	Subdivisão primária do terreno	E	M	B	B
	TMU	Unidades homogéneas em função da litologia, morfologia e processos	E	M	B	B
	Unidades geomorfológicas	Classificação genética das unidades geomorfológicas principais	E	E	M	B
	Subunidades geomorfológicas	Subdivisão geomorfológica do terreno em unidades mais pequenas	E	E	E	B
Uso do solo						
	Mapas	Tipo de uso do solo	E	E	E	E
	Modificações	Variação temporal do uso do solo	M	E	E	E
	Caract. vegetação	Tipo de vegetação, profundidade das raízes	B	M	E	E

Rede viária	Zonas de influência usadas por vezes como cartas de factores	M	E	E	E
Edifícios	Zonas de influência usadas por vezes como cartas de factores	M	E	E	E

Escala: N = nacional, R = regional, L = local e S = de sítio. Aplicabilidade dos parâmetros de acordo com a escala: E = elevada, M = média e B = baixa.

a) Modelo Digital de Elevação

Os modelos digitais de elevação (MDE) distinguem três tipos de modelos:

- Modelo digital de terreno (MDT) que descreve a altimetria do terreno, não incluindo edifícios;
- Modelo digital de edifícios que descreve estruturas;
- Modelo digital de superfície que descreve a superfície do terreno, incluindo estruturas.

A topografia, adquirida a partir da geração de uma representação digital da superfície do terreno, é um dos factores principais na análise da ocorrência de movimentos de terreno (Van Westen et al., 2008). Diversos mapas derivados, tais como os representativos do aspecto ou da curvatura do talude, podem ser produzidos a partir de operações simples em SIG. Os mapas derivados a partir de MDE podem ser utilizados em análises heurísticas a escalas pequenas (e.g. classificação fisiográfica, densidade de drenagem, etc.), em análises estatísticas a escalas médias (e.g. gradiente, curvatura e comprimento do talude, área de contribuição) e em modelação determinística a escalas maiores (e.g. direcção de drenagem local, percurso do fluxo, gradiente do talude).

Embora diversos mapas derivados possam ser produzidos a partir de um MDT, nem todos são adequados para a avaliação da susceptibilidade, e nem a todas as escalas, devido às limitações inerentes à resolução. Tal deve-se à regularidade do espaço amostral imposto pelos algoritmos de análise digital do terreno. As propriedades dos dados de um MDT (i.e. precisão dos dados e resolução espacial) podem assim introduzir erros na computação do talude e do seu aspecto. Por outro lado, a utilização de MDT de elevada resolução pode não corresponder com o nível de detalhe dos outros elementos geoambientais e as variações muito localizadas dos ângulos dos taludes podem não ser representativas de condições mais gerais em que ocorrem as instabilidades (Zhou & Liu, 2004).

b) Dados geológicos e do solo

Para a avaliação da susceptibilidade e perigosidade a movimentos de terreno, a informação do solo requerida é composta, essencialmente, por dois conjuntos de informação: o tipo de solo, com as respectivas propriedades geotécnicas e hidrogeológicas, e as sequências de solo, com informação sobre a profundidade das diferentes camadas. Estas *data layers* são componentes essenciais em qualquer modelação determinística (Van Westen et al., 2008). A profundidade do solo é um dos factores determinantes na avaliação da estabilidade, no entanto, esta só é determinada por logs de sondagem

ou métodos geofísicos, tornando assim este parâmetro bastante variável e impreciso em áreas de maior dimensão.

c) Uso do solo

De acordo com Van Westen et al. (2008), o uso do solo é frequentemente considerado como um factor estático na avaliação da estabilidade, no entanto as modificações resultantes da actividade humana (e.g. desflorestação, construção de vias, agricultura) têm um impacto importante na instabilidade do terreno.

O efeito da vegetação na estabilidade de um talude pode ser classificado como de natureza hidrológica ou mecânica. Os factores mecânicos consistem num reforço do solo pelas raízes. Os efeitos da superfície vegetal, em termos de processos hidrológicos, são compostos pela perda de precipitação por intercepção, remoção do teor em água do solo e mudanças na condutividade hidráulica (Van Westen et al., 2008). Esses autores defendem que uma avaliação determinística dinâmica requer mapas de uso do solo de vários períodos e com as respectivas modificações impostas pelos efeitos mecânicos e hidrológicos da vegetação. De todos os efeitos produzidos pela vegetação, o reforço do solo pelas raízes é o que mais contribui para a estabilidade do solo.

2.4.2.2 Parâmetros iniciadores do movimento

A informação relativa aos parâmetros iniciadores do movimento de instabilização apresentam, geralmente, uma maior importância temporal que espacial, excepto quando a área em estudo é de grandes dimensões. Este tipo de dados está relacionado com os dados de precipitação, temperatura e aceleração sísmica, registados ao longo de períodos de tempo suficientemente significativos de modo a se poder avaliar as relações de magnitude-frequência (Van Westen et al., 2008).

No entanto, para se poder relacionar os parâmetros iniciadores do movimento com as datas de ocorrências de instabilização passadas, deve haver uma inventariação suficientemente exaustiva dos movimentos de terreno, o que, como foi referido em 4.1.2, pode não existir ou ser insuficiente.

a) Precipitação e aceleração sísmica

A precipitação de elevada intensidade/duração é o principal mecanismo iniciador de movimentos de terreno no planeta. Tal também se verifica em Portugal, onde as instabilidades de vertente desencadeadas por sismos podem ser consideradas como negligenciáveis (Trigo e tal., 2005).

A precipitação pode desencadear diferentes tipos de movimentos de terreno consoante a sua duração e intensidade (Zêzere et al., 2005). Por exemplo, os escorregamentos translacionais superficiais são geralmente iniciados pela rápida infiltração da água numa camada fina de material terroso (e.g. coluvião) que se encontra sobreposta sobre material rochoso impermeável. O aumento temporário da pressão intersticial, aliado à perda de coesão aparente resultante da saturação do solo, provoca uma

redução crítica da resistência ao corte na camada terrosa ou no contacto com o material impermeável. Por outro lado, os escorregamentos rotacionais, translacionais e movimentos complexos profundos envolvem material que contém um coeficiente de difusidade hidráulica efectiva pequeno. Estes movimentos são iniciados pela redução da resistência ao corte do material, aliado à subida constante do nível freático resultante de períodos de precipitação prolongada (op. cit.).

Para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno provocados por acção sísmica, esta pode ser feita quantitativamente introduzindo um valor de aceleração crítica numa modelação do tipo talude infinito (op. cit.).

3. ENQUADRAMENTO DA 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 pelo Itinerário Complementar 17 (IC 17/CRIL), contíguo ao Rio da Costa, e a Sul pelo limite administrativo do concelho de Odivelas e do concelho de Lisboa. As coordenadas M e P aproximadas do local são, respectivamente, -90 035,008 e -97 289,594 (Datum 73, m).

A Figura 3.1 apresenta o enquadramento da área de estudo, na figura a amarelo. A azul e a vermelho estão representados os concelhos de Odivelas e Lisboa, respectivamente.

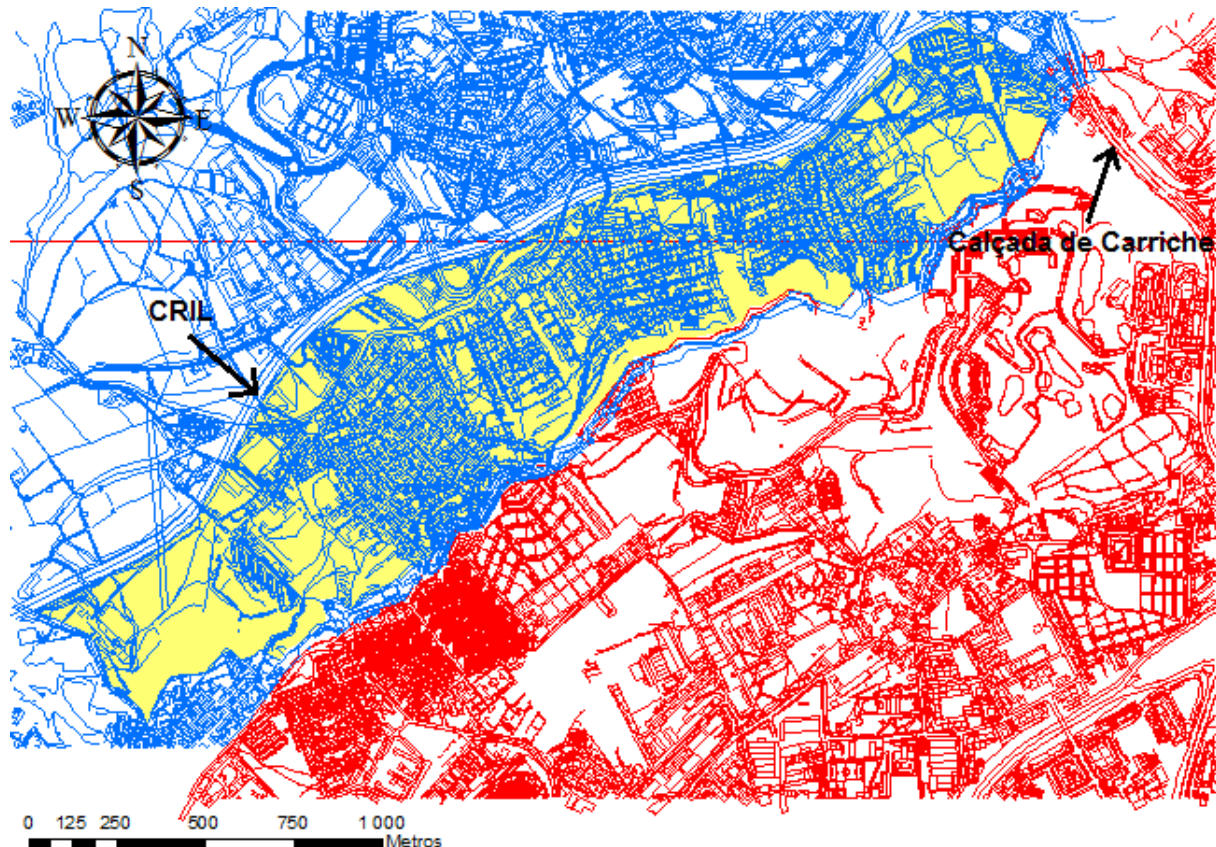


Figura 3.1 – Mapa da área de estudo

3.1 GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

Na região em estudo, a geomorfologia é caracterizada pelo relevo em costeira, conhecida localmente como Costeira de Odivelas – Vialonga, orientada de NE-SW. A área em estudo, inserida na Costeira de Odivelas – Vialonga, é caracterizada pela Vertente Sul do concelho de Odivelas, uma encosta virada a N-NW e que se estende por cerca de 10 km. Esta vertente prolonga-se desde a Calçada de Carriche/Senhor Roubado até perto da Pontinha, constituindo o limite Sul do concelho de Odivelas. O processo de evolução da Vertente Sul do concelho de Odivelas tem como principal interveniente os movimentos de massa.

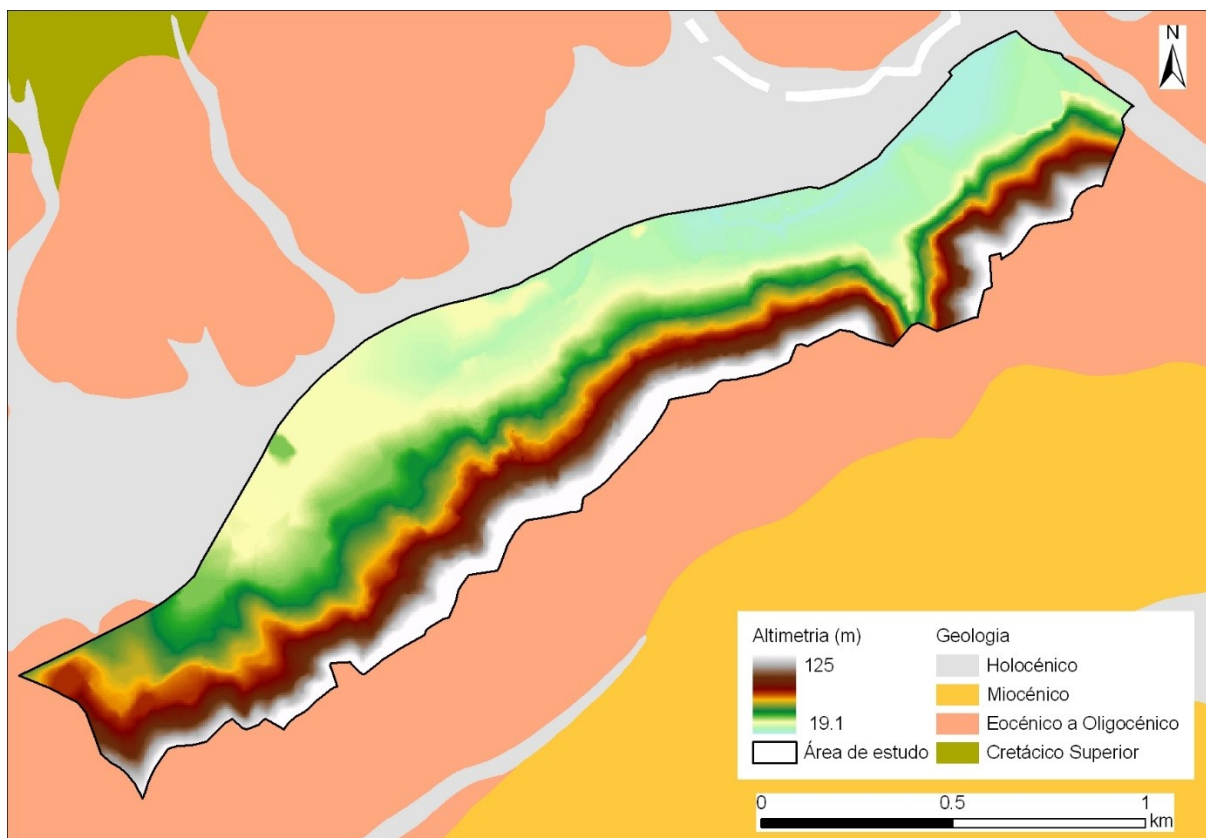


Figura 3.2 – Mapa da altimetria e da geologia da zona em estudo

A área em estudo apresenta cotas que variam entre os 25 e os 120 m (Figura 3.2). Distinguem-se quatro unidades geomorfológicas (Jorge & Ramos, 2012):

- a baixa aluvionar (declive [0-5%]) – 26,67% da área, variando as cotas entre 25 e 35 m;
- a zona intermédia (declive [5-15%]) – 23,37% da área, variando entre 25 e 60 m;
- a zona de declive (declive [15-50%]) – 43,30% da área, variando entre 40 e 90 m;
- a zona de crista (declive >50%) – 6,67% da área, sendo as cotas superiores a 80 m.

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 apresentam alternâncias de rochas com dureza, permeabilidade e plasticidade muito distintas (e.g. conglomerados bem consolidados, margas, argilas, arenitos, etc.) dispostos em estrutura monoclinial com pendores para S e SE, em direcção ao estuário do Tejo.

A caracterização geomorfológica é resultante da presença de terrenos aflorantes mais resistentes em relação aos materiais sobre-consolidados da Formação de Benfica e à estrutura geológica em monoclinial, que permitiram a geração de uma superfície de modelação por meteorização e erosão, com a criação de uma costeira, por escavação e encaixe do Rio da Costa que corre na baixa aluvionar. Assim, o vale do Rio da Costa apresenta um perfil não homogéneo, com a vertente direita (Vertente

Sul do concelho de Odivelas) muito íngreme e a vertente esquerda com declive suave (Jorge & Ramos, 2012).

Superficialmente estabelecem-se aterros (At) de génese contemporânea. Os depósitos de coluvião, que se identificam em diversas zonas do perfil ao longo da vertente, resultam de materiais oligocénicos descomprimidos, alterados e erodidos que se acumularam por acção da gravidade. Identificam-se também, sobre as aluviões e sobretudo ao longo da vertente, aterros de origem antrópica resultantes de materiais lançados a partir da crista da vertente, suavizando parcialmente o carácter da geomorfologia muito íngreme. Este material é proveniente de grandes escavações realizadas para a construção de empreendimentos na zona. Os aterros recentes são muito heterogéneos e constituem áreas descontínuas sobrejacentes aos terrenos da Formação de Benfica e aos depósitos aluvionares. São normalmente constituídos por material areno-argiloso e argilo-arenoso, com elementos líticos e, por vezes, com restos de cerâmica. A sua espessura é muito variável, atingindo, na baixa aluvionar, um valor máximo compreendido entre 4 e 5 m (op. cit).

A análise de informação decorrente da realização de 3 sondagens geotécnicas à rotação com recuperação de testemunho, realizadas pela empresa GEOCONTROLE – Geotecnia e Estruturas de Fundação SA, permitiram sistematizar as diferentes unidades lito-estratigráficas ocorrentes na área em estudo (Tabela 3.1).

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 uma maior permeabilidade horizontal nos estratos mais permeáveis. Deste cenário podem resultar diversos níveis aquíferos suspensos, pouco contínuos, mas com interferência na estabilidade local (Jorge & Ramos, 2012).

Tabela 3.1 - Coluna lito-estratigráfica da área em estudo (adaptado de Jorge & Ramos, 2012)

ESTRATIGRAFIA	símbolo	FORMAÇÃO	LITOLOGIA
MODERNO	At	Depósitos de Aterro	Aterros heterogéneos, predominantemente areno-siltosos, com abundantes fragmentos líticos e restos cerâmicos
EOCÉNICO-OLIGOCÉNICO	Φ_{Bf}	Formação de Benfica	Arenito muito friável transformado em areias argilosas com inúmeros clastos em matriz areno-siltosa
			Conglomerado poligénico de matriz argilo-siltosa, muito consolidado
			Arenito poligénico heterométrico, muito consolidado e não friável
			Margas calco-gresosas, muito consolidadas, alaranjadas e avermelhadas

3.2 CLIMA

O concelho de Odivelas situa-se no litoral oeste de Portugal, sendo as suas características climatéricas directamente influenciadas pelo Oceano Atlântico. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da área em estudo é do tipo mediterrânico, subtipo Csa, correspondendo a um clima temperado, com Verões quentes e secos (Zêzere et al., 1999 apud Jorge & Ramos, 2012).

Na área em estudo, a distribuição inter-anual da precipitação é bastante irregular podendo ocorrer longos períodos de precipitação intensa alternados com períodos mais secos. Pontualmente ocorrem eventos de precipitação muito intensa que provocam cheias nas zonas mais baixas. De um modo geral, o regime de precipitação apresenta um padrão sazonal bastante evidente, com uma grande diferença entre as estações chuvosas que se estendem de Outubro a Março (70% do total) e as estações secas de Junho a Setembro (Zêzere, 2002).

Segundo Zêzere (2002), a média da precipitação anual na região que abrange a área em estudo é de 730 mm, no entanto, de acordo com uma análise realizada por Sousa (2013), este valor foi ultrapassado em cerca de metade dos anos considerados. É referido por aquela autora que nos anos de 1963/64, 1965/66, 1968/69, 1978/79, 1995/96, 1997/98, 2009/10 e 2010/11 foram registadas precipitações anuais superiores a 1000 mm.

Jorge & Ramos (2012) e Sousa (2013) referem que nos últimos 12 anos tem-se vindo a verificar um aumento da precipitação mensal devido a alterações climatéricas, com incidência muito significativa nos meses de Outubro e Novembro (Figura 3.3).

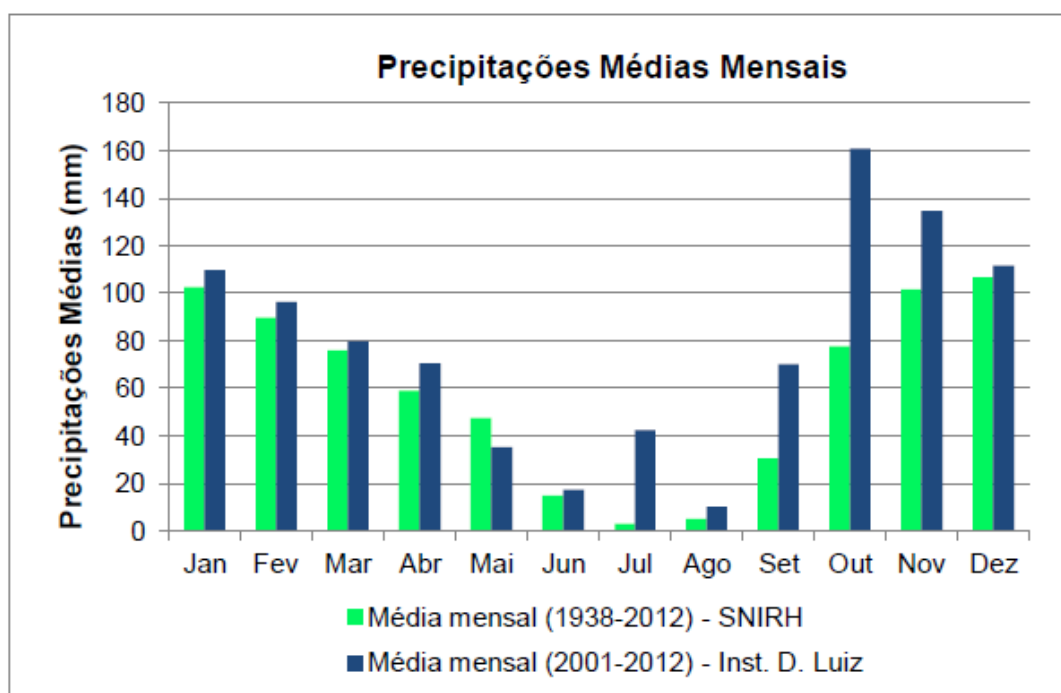


Figura 3.3 – Precipitações médias mensais para a área em estudo (Sousa, 2013)

No que respeita à temperatura, após uma análise por parte de Sousa (2013) das médias dos valores máximos e mínimos de cada mês para o período de 1938 a 2012, a autora verifica que os meses de Inverno e Primavera apresentam, em média, temperaturas inferiores a 15 °C e os meses de Verão excedem, normalmente os 20 °C. Os meses mais frios correspondem aos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, enquanto que os meses mais quentes são Julho, Agosto e Setembro.

Relativamente à humidade do ar, parâmetro que está muito relacionado com a precipitação, os valores da humidade relativa do ar variam entre 63% - valor registado às 15:00h nos meses de Julho e Agosto, e 82% - valor registado às 9:00h no mês de Janeiro (Jorge & Ramos, 2012).

Em relação à evaporação, os valores médios são essencialmente mais elevados para os meses de Verão e mais baixos para os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Quanto à insolação total diária, os valores médios são mais elevados, em geral, para os meses de Junho, Julho e Agosto. Por sua vez, os valores médios da insolação total diária são, por norma, muito mais baixos para os meses de Outono e de Inverno, mas com variações significativas (op. cit).

3.3 SISMICIDADE

Do ponto de vista estrutural, o elemento mais importante desta região é o sinclinal do Tejo, de orientação geral NE-SW e cujo flanco ocidental é constituído por formações geológicas que vão desde o Lusitaniano até ao Pliocénico. O conjunto destas formações inclina para S e SE.

De acordo com a norma NP EN 1998-1 (2010), a região abrangida situa-se na zona sísmica 1.3 e 2.3, respectivamente, para a acção sísmica tipo 1 e 2, o que corresponde a acelerações de 1,5 e 1,7 m.s⁻².

Após análise dos documentos de base de identificação do risco sísmico do concelho de Lisboa, e por continuidade das condições de fronteira, Jorge & Ramos (2012) referem que a vulnerabilidade sísmica das vertentes da área em estudo poderia ser classificada como elevada e a área de aluvião do Rio da Costa e da Ribeira de Vale do Forno poderia ser classificada como muito elevada. Com vulnerabilidade sísmica muito elevada poderia ser classificado o aterro de resíduos urbanos de Vale do Forno, com potenciais repercussões graves na zona baixa do bairro de Vale do Forno.

No mapa da intensidade microssísmica de Portugal continental que se apresenta na Figura 3.4, pode-se verificar que a área de estudo está classificada com o grau IX de intensidade.

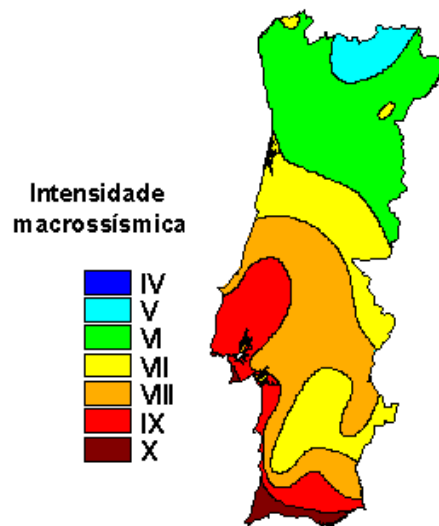


Figura 3.4 – Mapa da intensidade microssísmica em Portugal continental (retirado de LNEC, 2005)

3.4 OCUPAÇÃO DO SOLO

A área em estudo apresenta cerca de 160 hectares, sendo 120 destes ocupados pelos bairros Serra da Luz, Quinta do José Luís, Encosta da Luz, Vale do Forno e Quinta das Arrombas (Figura 3.5). Cada bairro apresenta uma população diferenciada. Inseridos na Vertente Sul do concelho de Odivelas, os bairros acima apresentados constituem Áreas de Reabilitação Urbana enquadradas administrativamente nas freguesias sede de concelho e da Pontinha (Andrade et al., 2012).



Figura 3.5 – Bairros da Vertente Sul de Odivelas (adaptado de Andrade et al., 2012)

A faixa da Vertente Sul de Odivelas, que inicialmente correspondia a uma ocupação rural até à década de 60, teve um desenvolvimento rápido e desordenado. O solo passou de uso rural para uso urbano, sem ter existido uma avaliação da respectiva adequação à urbanização ou à edificação (Jorge & Ramos, 2012).

A área de estudo pode ser dividida em sete unidades, de SW para NE:

- 1) Escola Agrícola da Paiã e Bairro Menino de Deus;
- 2) Quinta das Lágrimas e Quinta das Arrombas;
- 3) Serra da Luz;
- 4) Quinta do José Luís;
- 5) Encosta da Luz;
- 6) Vale do Forno;
- 7) Senhor Roubado.

A encosta da primeira unidade não apresenta ocupação urbanística, sendo o topo da vertente, em zona já recuada, ocupada por edifícios do Bairro Mário Madeira. Na base desta, para Este, existe o Bairro Menino de Deus (op. cit.).

A Quinta das Lágrimas corresponde a uma área essencialmente agrícola, com excepção da faixa junto à estrada que foi ocupada por uma fiada de edificações que dão apoio a algumas parcelas hortícolas aí desenvolvidas. A Quinta das Arrombas (Figura 3.6) tem, por sua vez, ocupação urbanística na parte mais baixa, assim como também a meia encosta, que liga directamente com o bairro da Serra da Luz. A restante área é ocupada por vegetação herbácea e arbustiva (op. cit.).



Figura 3.6 – Fotografia da localidade Quinta das Arrombas em primeiro plano e bairro Serra da Luz ao fundo

O bairro da Serra da Luz (Figura 3.7) é uma área que apresenta quase exclusivamente ocupação urbanística. Esta desenvolve-se de forma muito densa, desde a baixa aluvionar até ao topo da vertente, com excepção do limite Este (op. cit.).



Figura 3.7 – Fotografia de pormenor do bairro Serra da Luz

A taxa de ocupação do solo no bairro Quinta do José Luís é, comparativamente com os outros bairros, a mais baixa. Existe uma ocupação mista entre habitacional, serviços e agricultura. Este bairro desenvolve-se essencialmente na faixa correspondente aos declives mais suaves. Na faixa de declives mais acentuados, a ocupação do solo é praticamente inexistente com excepção de três ou quatro edifícios (op. cit.).

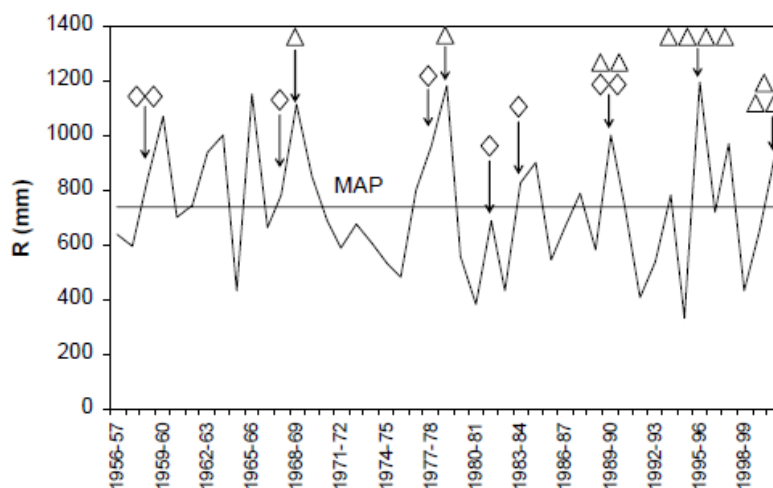
O bairro da Encosta da Luz apresenta uma ocupação mais ordenada do que os outros bairros vizinhos. A secção mais a Oeste possui uma ocupação mais densa, essencialmente em termos de edificação para fins habitacionais, enquanto na secção E verifica-se que grande parte dos lotes não estão ocupados. Na parte inferior do bairro, na área plana, a metade Este encontra-se praticamente desocupada, enquanto a metade Oeste tem já uma importante ocupação do solo em termos de edificações, principalmente para serviços (op. cit.).

O bairro do Vale do Forno apresenta uma elevada taxa de ocupação urbanística do solo na baixa aluvionar do Rio da Costa e no leito da ribeira de Vale do Forno. A vertente da margem Este da ribeira de Vale do Forno encontra-se fortemente ocupada porque as condições geológicas assim o permitem, apesar das deficientes características de construção de algumas edificações aí erigidas. Na margem Oeste da mesma ribeira, a vertente apresenta, essencialmente, uma cobertura vegetal arbustiva densa, com excepção de um pequeno grupo de edificações (op. cit.).

A zona do Senhor Roubado, correspondente a uma área da vertente que apresenta apenas ocupação agrícola, não é presentemente explorada. Existem edificações apenas no sopé da vertente, de uso industrial e algumas habitações. Recentemente foi construída a Interface do Senhor Roubado, onde as principais estruturas do metropolitano intersectam a encosta numa localização de declive já bastante acentuado, o que obrigou a obras de escavação e de contenção específicas (op. cit.).

3.5 MOVIMENTOS DE TERRENO

Na área em estudo, os movimentos de terreno são maioritariamente induzidos pela precipitação (Figura 3.8) 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 linha horizontal (MAP) indica a precipitação média anual. Os losangos indicam episódios de instabilidades superficiais e os triângulos indicam episódios de instabilidades profundas

Figura 3.8 - Distribuição da precipitação anual em São Julião do Tojal, região a norte de Lisboa, de 1956/1957 a 2000/2001 (Zêzere et al., 2005)

Os dois tipos de movimento estão directamente relacionados com a duração da precipitação. As precipitações intensas são responsáveis pelo rápido incremento de pressão intersticial e pela perda de

coesão aparente em solos finos, resultando em rotura na camada ou no contacto entre o solo e a camada impermeável. Por seu lado, as precipitações com períodos mais prolongados permitem a subida do nível freático, resultando assim em roturas profundas em material terroso ou rochoso, através da redução da resistência ao corte (Salvação et al. 2010).

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 & Zêzere, 2011). De acordo com Zêzere et al. (2005), o tipo de movimento mais frequente na região em estudo é o escorregamento translacional superficial. Este caracteriza-se por um movimento de massa exibindo uma superfície de rotura planar e com dimensão lateral geralmente pequena. Na maioria dos casos, os movimentos superficiais ocorrem em taludes de elevada inclinação e afectam depósitos de coluvião.

3.6 ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Neste subcapítulo são apresentados dois documentos respeitantes ao ordenamento do território na zona estudada. Numa primeira parte são apresentadas as recomendações para a delimitação da Reserva Ecológica Nacional (REN), no caso específico de áreas de instabilidade de vertentes. A seguir são apresentadas as recomendações de zonamento de aptidão à construção do Plano Director Municipal (PDM) de Odivelas.

a) Reserva Ecológica Nacional

A Reserva Ecológica Nacional (REN) é uma Restrição de Utilidade Pública que, entre outros aspectos, tem por objectivo preservar a estrutura biofísica do território nacional e, nesse sentido, visa delimitar e integrar áreas perigosas, nomeadamente salvaguardando-as de potenciais ocupações do solo (Henriques, 2009; Jorge & Ramos, 2012).

A REN foi criada em 1983 pelo Decreto-Lei n.º 321/83 de 5 de Julho. Este Decreto-Lei foi posteriormente revogado pelo artigo 20.º do Decreto-Lei 93/90 de 19 de Março sendo este último alterado pelo Decreto-Lei n.º 180/2006 de 6 de Setembro. Por fim, houve nova revogação pelo Decreto-Lei n.º 166/2008 de 22 de Agosto (Prevenção de riscos naturais).

No Decreto-Lei n.º 166/2008 de 22 de Agosto, as áreas interditas são, no âmbito do estudo em causa, as referidas no artigo 4.º, no ponto 4:

- a) As áreas de prevenção de riscos naturais, para a situação em causa, de acordo com a seguinte tipologia: i) zonas adjacentes, ii) zonas ameaçadas por cheias não classificadas (...), iii) áreas de risco de erosão hídrica do solo e iv) áreas de instabilidade de vertentes.

De acordo com o exposto na Secção III do Decreto-Lei n.º 166/2008 de 22 de Agosto, em relação às áreas de instabilidade de vertentes, tem-se que:

1. As áreas de instabilidade de vertentes são as áreas que, devido às suas características de solo e subsolo, declive, dimensão e forma da vertente ou escarpa e condições hidrológicas, estão sujeitas à ocorrência de movimentos de massa em vertentes, incluindo os deslizamentos, os deslocamentos e a queda de blocos;
2. Na delimitação de áreas de instabilidade de vertentes deve considerar-se as suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas;
3. Em áreas de instabilidade de vertentes podem ser realizados os usos e acções que não coloquem em causa, cumulativamente, as seguintes funções: i) estabilidade dos sistemas biofísicos, ii) salvaguarda face a fenómenos de instabilidade e de risco de ocorrência de movimentos de massa em vertentes e de perda de solo e iii) prevenção de segurança de pessoas e bens.

Em REN-AML (2010), a avaliação do perigo de movimentos de massa em vertentes na área metropolitana de Lisboa foi efectuada com base numa abordagem indirecta, a partir do cruzamento dos dois principais factores condicionantes da instabilidade das vertentes: litologia e declive. Os vários tipos litológicos presentes na região foram agrupados em seis grandes conjuntos. Para cada conjunto litológico foi definido o limiar crítico de declive (em graus), acima do qual é expectável a ocorrência de fenómenos de instabilidade, independentemente da respectiva tipologia (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Limiares de declive críticos considerados para a identificação das áreas susceptíveis à instabilidade de vertentes na área metropolitana de Lisboa (REN-AML, 2010)

Litologia	Declive (°)
Depósitos superficiais	10
Rochas carbonatadas compactas	25
Rochas sedimentares detríticas (grés, conglomerados)	15
Rochas sedimentares plásticas (margas, argilas)	10
Rochas graníticas e afins	25
Rochas vulcânicas	20

Com base nos dados da Tabela 3.2 obteve-se um mapa da zona de estudo com os limiares de declive críticos para rochas sedimentares detríticas e plásticas (Figura 3.9).

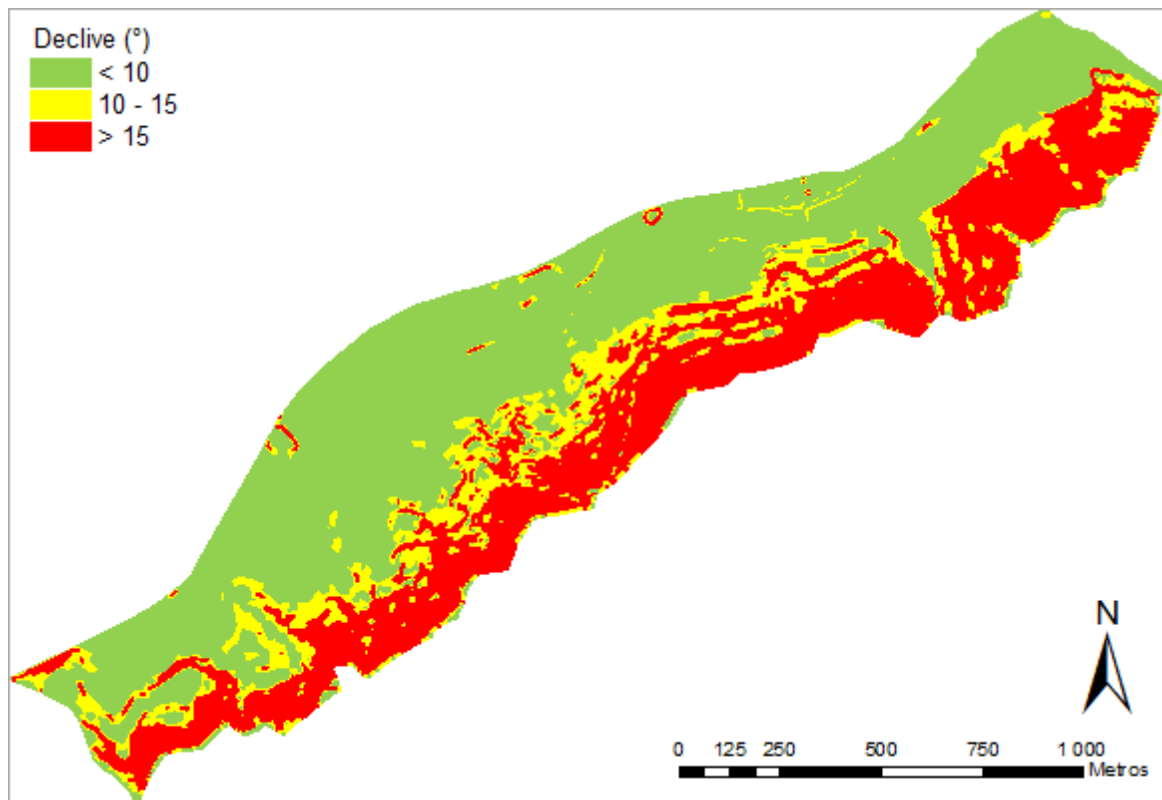


Figura 3.9 – Mapa da zona de estudo com os limiares de declive críticos para rochas sedimentares detríticas e plásticas

b) Plano Director Municipal de Odivelas

O estudo de orientação para o planeamento do concelho de Odivelas (Costa Lobo & Pardal, 2003) recomenda a seguinte delimitação para a aptidão à construção, em função do declive (Figura 3.10):

- Declive inferior a 15% (< 8,53°) – zona apta à construção;
- Declive entre 15% e 25% (8,53° a 14,04°) – zona pouco apta para construção, o risco de instabilidade nas construções aumenta;
- Declive entre 25% e 50% (14,04° a 26,57°) - a construção é muito condicionada e com muitos riscos se não forem tomadas medidas especiais nessas zonas para estabilização;
- Declive superior a 50% (> 26,57°) – zona não apta a construção.

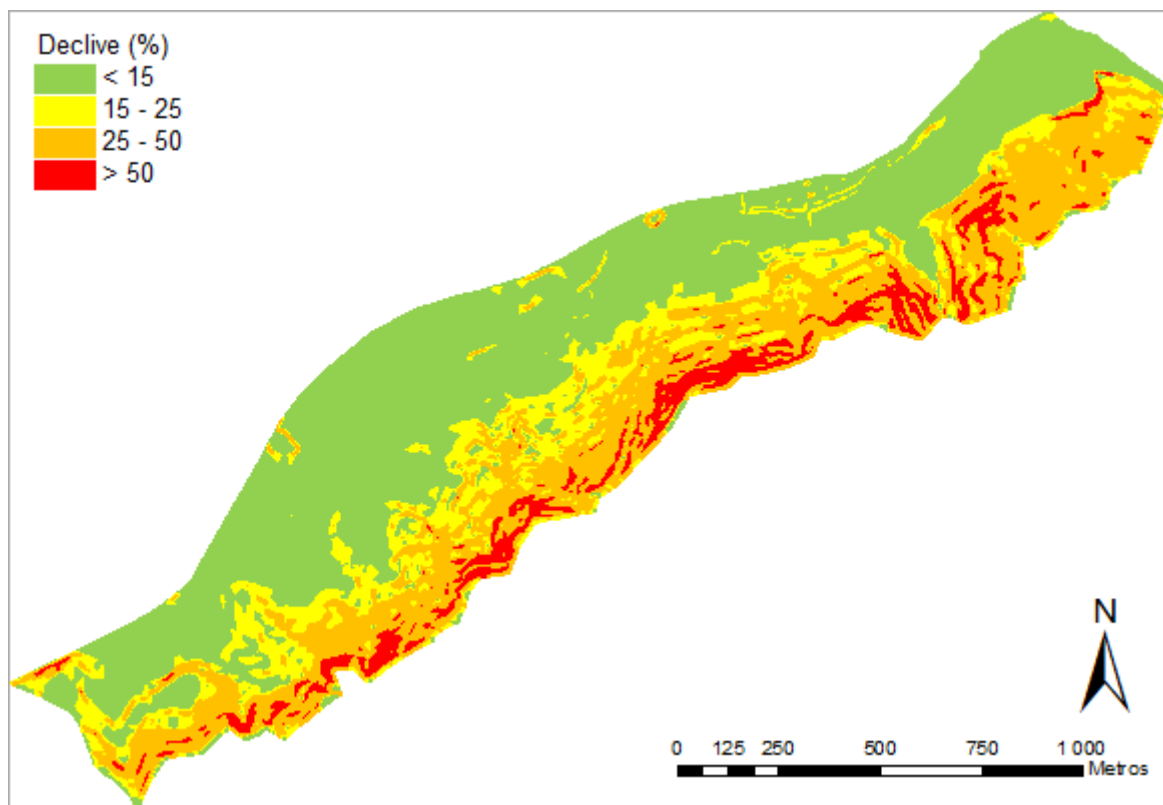


Figura 3.10 – Mapa com as zonas de aptidão à construção recomendadas no estudo de orientação para o planeamento do concelho de Odivelas

4. METODOLOGIA

Atendendo às características da área estudada, neste trabalho propõe-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. Para o presente estudo, é ainda introduzido um modelo hidrológico de regime permanente.

Assim, neste capítulo são abordados, numa primeira parte, os conceitos teóricos relacionados com a estabilidade de taludes e os inerentes às duas técnicas do modelo determinístico usadas na elaboração do presente estudo: análise determinística absoluta e análise determinística com componente estocástica.

Por fim, é apresentada a parametrização dos modelos, nomeadamente dos dados de entrada topográficos, geotécnicos, hidrogeológicos e de precipitação atmosférica.

4.1 TÉCNICAS PARA AVALIAR A SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE TERRENO

Na modelação determinística, existem diversas abordagens de avaliação da estabilidade de uma vertente e dos respectivos movimentos de terreno. As abordagens podem variar consoante o tipo e a profundidade da instabilidade, o regime hidrológico em curso e as características do terreno, entre outros.

De modo a quantificar os potenciais escorregamentos translacionais na área de estudo, 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 & Montgomery, 1998). Estes modelos analisam áreas susceptíveis a instabilidades de vertente com base em dados de MDT para o cálculo de um índice de estabilidade (SINMAP) ou da recarga efectiva crítica necessária para induzir a rotura em cada célula (SHALSTAB). Embora os programas em si não tenham sido utilizados no presente trabalho, pois surgiram problemas de instalação e execução, os respectivos fundamentos matemáticos foram aplicados por outros processos, nomeadamente com recurso ao Microsoft Excel (2013).

Estes modelos foram adoptados devido às características que apresentam, nomeadamente os dados de entrada utilizados, 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 usam modelos numéricos e pressupostos hidrológicos de regime permanente similares para a quantificação da influência da topografia na pressão intersticial (Witt, 2005).

De seguida são apresentadas as duas técnicas de análise utilizadas para a avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno do tipo translacional superficial. A primeira tem por base uma modelação determinística absoluta e, a segunda, uma modelação determinística com componente estocástica.

4.1.1 Teoria da estabilidade de um talude

O aumento das tensões numa encosta e/ou a redução da resistência ao corte do terreno, podem causar movimentos de massas de solo, por rotura. Assim, a estabilidade dos taludes pode ser avaliada comparando as forças que resistem à rotura com as forças que tendem a conduzir à rotura (Lamas, 2012). Na ocorrência de uma instabilidade, o plano de rotura no solo forma-se quando as forças estabilizadoras se tornam menores que as forças desestabilizadoras, como descrito em 2.1.1.4.

A relação entre estas forças é expressa pelo factor de segurança global (FS) que é definido como a relação entre a resistência mobilizada na superfície de rotura e a acção do peso e sobrecargas. O conceito de FS é introduzido de modo a definir quantitativamente o grau de estabilidade de uma fracção de um talude previamente estudada, empregando equações de equilíbrio.

À condição de equilíbrio limite, corresponde um FS unitário. Um talude com um FS superior a 1 assume-se como tendencialmente estável e, com um FS inferior a 1, como tendencialmente instável. No entanto, na prática, existem casos de taludes instáveis para os quais se avaliou um FS superior a 1. Tal acontece tanto por causa das excessivas simplificações dos principais métodos de análise como da própria variabilidade dos parâmetros geotécnicos e geométricos envolvidos na análise (Lamas, 2012).

4.1.1.1 Modelo de equilíbrio limite em talude infinito

A formulação do modelo de estabilidade de talude infinito baseia-se no critério de rotura de Mohr-Coulomb, onde, no momento da rotura de um talude, as forças de corte igualam as forças estruturantes, isto é:

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan\varphi \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde τ – tensão de corte (kPa);

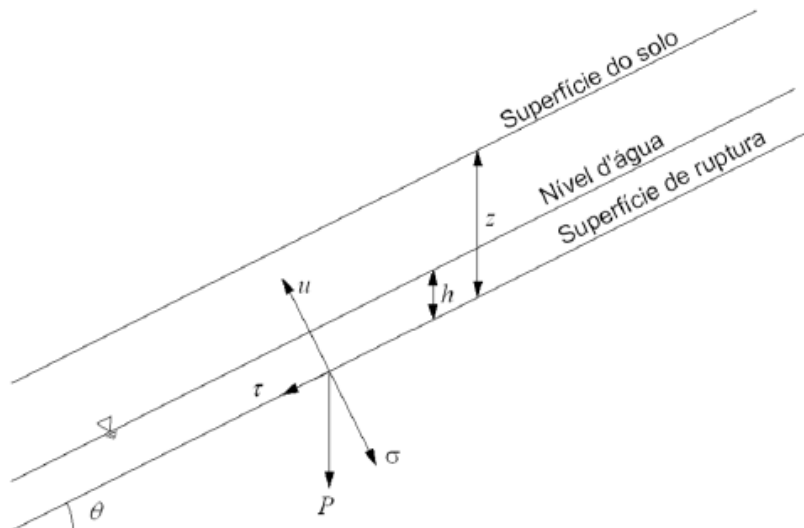
c – coesão (kPa);

σ – tensão normal (kPa);

u – pressão intersticial (kPa);

φ – ângulo de atrito interno do solo (°).

A Figura 4.1 mostra um esquema ilustrativo do modelo de talude infinito, onde P representa o peso do solo, h a espessura de solo saturado, z a profundidade vertical do solo e θ o declive da vertente.



A simbologia representada na figura encontra-se no corpo do texto.

Figura 4.1 - Esquema ilustrativo do modelo de talude infinito (Michel et al., 2012)

Selby (1993) propôs uma reformulação para a aplicação da equação 4.1 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. O modelo de estabilidade de talude infinito descrito por Selby (1993) é:

$$\gamma_h \cdot z \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{cos}\theta = c_r + c_s + (\gamma_s \cdot z \cdot \text{cos}^2\theta - \gamma_w \cdot h \cdot \text{cos}^2\theta) \cdot \text{tan}\varphi \quad (\text{Equação 4.2})$$

onde γ_h – peso volúmico húmido do solo ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

z – profundidade do solo (m);

θ – declive da vertente ($^\circ$);

c_r – coesão das raízes (kPa);

c_s – coesão do solo (kPa);

γ_w – peso volúmico da água ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

h – altura de solo saturado (m).

Através da equação 4.2, é possível obter um índice de estabilidade adimensional, ou seja, o FS do modelo de estabilidade de talude infinito, comparando os componentes desestabilizadores com os componentes estabilizadores, como demonstrado pela equação 4.3. Esta equação é comumente aplicada na modelação de estabilidade de taludes em ambientes SIG (Witt, 2005).

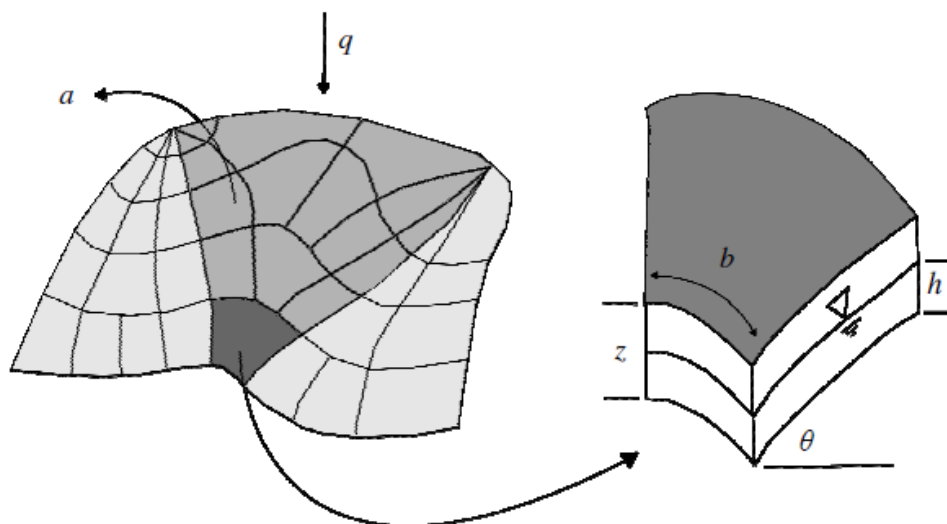
$$FS = \frac{c_r + c_s + (\gamma_h \cdot z \cdot \text{cos}^2\theta - \gamma_w \cdot h \cdot \text{cos}^2\theta) \cdot \text{tan}\varphi}{\gamma_h \cdot z \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{cos}\theta} \quad (\text{Equação 4.3})$$

O modelo de estabilidade de talude infinito assume diversas simplificações (Witt, 2005; Zizioli et al., 2013). Em primeiro assume-se um paralelismo entre o plano de rotura e o nível freático. Este pressuposto é razoável pois, em depósitos de coluvião, o nível freático costuma ser paralelo à barreira

de drenagem (i.e. camada impermeável subjacente, com ausência de drenagem profunda e fluxo). Tal acontece devido ao contraste entre a condutividade hidráulica do solo e a da camada subjacente que forma a barreira à drenagem, causando assim um fluxo praticamente paralelo à superfície do terreno. Outra simplificação é a de que o plano de rotura assume-se de extensão infinita e que a resistência ao movimento nas extremidades da camada de rotura é negligenciável. Por fim, o solo apresenta-se como tendo espessura uniforme.

4.1.1.2 Modelo hidrológico de regime permanente

O modelo hidrológico de regime permanente que é utilizado neste trabalho baseia-se nos trabalhos de Beven & 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 4.2 esquematiza este modelo, onde q é a recarga efectiva em $m \cdot dia^{-1}$ (i.e. precipitação menos evapotranspiração), a representa a área de contribuição a montante em m^2 , e b é a largura da unidade de terreno em m (i.e. o comprimento da fronteira inferior de cada área de contribuição).



A simbologia representada na figura encontra-se no corpo do texto

Figura 4.2 - Esquema ilustrativo do modelo hidrológico de regime permanente (Michel et al., 2012)

O'Loughlin (1986) define "humidade" (*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 4.4 representa a formulação final do modelo hidrológico de regime permanente.

$$w = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \text{sen}\theta} = \frac{h}{z} \quad (\text{Equação 4.4})$$

$$\text{em que } T = k_s \cdot z \cdot \text{cos}\theta \quad (\text{Equação 4.5})$$

onde w – humidade do solo ($m \cdot m^{-1}$);

T – transmissividade do solo ($m^2 \cdot dia^{-1}$);

k_s – condutividade hidráulica do solo saturada ($m \cdot dia^{-1}$).

Beven & Kirkby (1979) desenvolveram o parâmetro de área de contribuição específica A (Equação 4.6) definido como a área de contribuição por unidade de comprimento da fronteira inferior da mesma, em $m^2 \cdot m^{-1}$ (Figura 4.3). 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 & Dietrich, 1994).

$$A = \frac{a}{b} \quad (\text{Equação 4.6})$$

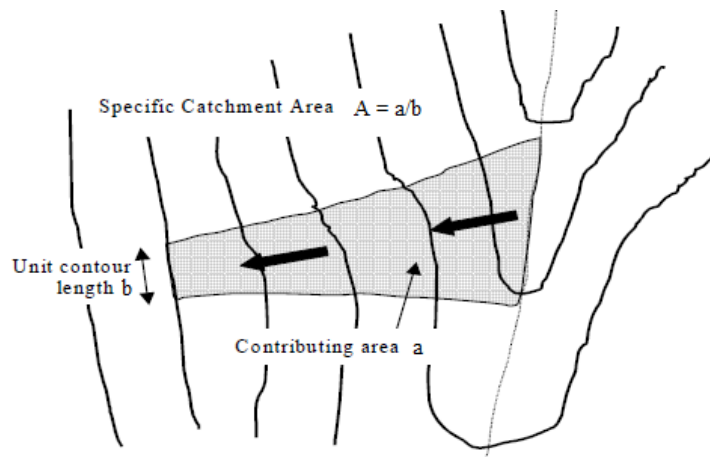


Figura 4.3 - Representação esquemática da área de contribuição específica (adaptado de Pack et al., 2005)

Seguindo os pressupostos dos modelos hidrológicos desenvolvidos com base no índice de “humidade” do solo (Beven & Kirkby, 1979; O’Loughlin, 1986), tem-se que:

- b) O fluxo lateral sub-superficial segue os gradientes topográficos. Tal implica que a área contributiva para o fluxo em qualquer ponto corresponde à área de contribuição específica definida pela superfície topográfica.
- c) A descarga lateral em cada ponto encontra-se em equilíbrio com a recarga efectiva de regime permanente q .
- d) A capacidade para haver fluxo lateral em cada ponto é obtido por $T \cdot \sin \theta$. Assume-se uma condutividade uniforme na camada sobrejacente à barreira impermeável.

Assim, pelos pressupostos 1) e 2), obtém-se que a descarga lateral R , em $m^2 \cdot dia^{-1}$, é dada por:

$$R = q \cdot A \quad (\text{Equação 4.7})$$

O pressuposto 3) assume a seguinte “humidade relativa”:

$$w = \min\left(\frac{q \cdot A}{T \cdot \sin \theta}, 1\right) \quad (\text{Equação 4.8})$$

A “humidade relativa” tem um limite superior de valor 1, pois qualquer excesso de teor em água é considerado como fluxo superficial, indicando saturação da área (Pack et al., 2005; Damacena et al, 2010). Como ilustrado pela Figura 4.1 e equação 4.4, a “humidade relativa” define a profundidade do nível freático na camada de solo estudada.

Dietrich & Montgomery (1998) definem ainda, da equação 4.4 a relação topográfico $\frac{a}{b} \sin \theta$. Esta captura o essencial dos efeitos da topografia no escoamento e é composta por dois termos: a/b que representa a convergência topográfica onde se concentra o fluxo sub-superficial e aumenta a pressão intersticial, e $\sin \theta$ que corresponde ao declive da vertente e pelo qual se verifica que, para um maior declive, o escoamento é mais rápido e onde, conseqüentemente, é menor a “humidade relativa” definida por h/z (Equação 4.8).

4.1.2 Técnicas de análise

Existem muitas técnicas para avaliar a previsão de ocorrências de instabilidades em vertentes. Alguns modelos são simples e baseiam-se na identificação de áreas perigosas consoante um valor de declive crítico mas não têm em conta os efeitos da forma da topografia (e.g. concavidade das vertentes) e a litologia. Outros são mais complexos e a sua parametrização comporta mais dados de entrada, tais como a área de contribuição, a espessura do solo, a coesão, a precipitação, o uso do solo, entre outros.

As modelações apresentadas neste trabalho inserem-se na categoria das técnicas de análise mais complexas. A primeira técnica segue uma modelação determinística absoluta baseada no programa SHALSTAB, enquanto que a segunda, baseada no programa SINMAP, tem uma componente estocástica. As duas técnicas de análise apresentam-se de seguida.

4.1.2.1 Modelação determinística absoluta

Na análise adoptada, do tipo determinística absoluta, é proposto uma avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno com base na modelação efectuada pelo programa SHALSTAB desenvolvido por Dietrich & Montgomery (1998). Aqueles autores definiram o modelo com a intenção de ser o mais simples e com o mínimo de dados de entrada possível. Assim, a maioria dos dados de entrada deriva directamente dos mapas (e.g. declive) produzidos através do MDE. Os parâmetros geotécnicos introduzidos são valores fixos, ou seja, não é tido em conta uma variação destes, ao contrário do que acontece na modelação do programa SINMAP (Witt, 2005).

Outra simplificação que acontece no programa SHALSTAB é considerar-se a coesão nula. Esta aproximação é incorrecta na maioria das aplicações pois, ainda que a coesão do solo seja praticamente

nula, existe sempre a coesão associada à vegetação. No entanto, de acordo com Dietrich & Montgomery (1998), mesmo que a coesão das raízes seja introduzida, esta varia bastante espacial e temporalmente, o que torna a sua quantificação muito complexa, sobretudo à escala de uma bacia hidrográfica. Outra razão avançada para a exclusão da coesão é a oportunidade de tornar a análise mais conservativa, pois assim é aumentada a instabilidade potencial na área em estudo.

Como referido, o SHALSTAB é um modelo determinístico baseado na combinação do modelo de estabilidade de talude infinito com o modelo hidrológico de regime permanente. A implementação do modelo utiliza o MDE, em formato *raster* para extração dos valores de elevação, pelo qual posteriormente são calculados os declives e as áreas de contribuição específica (Damacena et al., 2005).

Ao eliminar a coesão, a equação 4.2 pode ser escrita como:

$$\gamma_h \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = (\gamma_h \cdot z \cdot \cos^2\theta - \gamma_w \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\varphi \quad (\text{Equação 4.9})$$

A equação 4.9 pode ser resolvida para h/z (Figura 4.2), que representa a proporção da coluna de solo que se encontra saturada no momento da instabilidade (Dietrich & Montgomery, 1998).

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) \quad (\text{Equação 4.10})$$

O valor de h/z pode variar entre 0, quando o declive é igual ao ângulo de atrito, e γ_h/γ_w quando o declive é nulo ($\tan\theta = 0$). No entanto, à semelhança das equações 4.4 e 4.8, h/z tem um limite superior de 1. Assume-se que o plano de rotura e o fluxo sub-superficial são paralelos à superfície do terreno, pelo que h/z pode apenas tomar valores inferiores ou iguais a 1. Qualquer célula que requeira h/z superior a 1 é assim incondicionalmente estável, ou seja, nenhuma tempestade pode levar o talude à rotura (op. cit.).

Com base na equação 4.10, são definidos quatro campos de estabilidade distintos. Dois destes campos de estabilidade correspondem a condições extremas. A primeira condição extrema define que qualquer declive superior ou igual ao ângulo de atrito faz com que o parâmetro de resistência do solo ($\tan\varphi$) não seja capaz de compensar o elevado declive da encosta (Equação 4.11). Esta condição é definida como incondicionalmente instável. Na segunda condição extrema, h/z excede ou iguala o valor de 1 (i.e. a camada de solo encontra-se totalmente saturada) e a relação entre os parâmetros de resistência do solo é maior que o declive do talude (Equação 4.12). A célula é então considerada como incondicionalmente estável (Dietrich & Montgomery, 1998; Dietrich et al., 2001; Damacena et al., 2005).

$$\tan\theta \geq \tan\varphi \quad (\text{Equação 4.11})$$

$$\tan\theta \leq \tan\varphi \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_h}\right) \quad (\text{Equação 4.12})$$

Estas condições extremas são independentes dos parâmetros hidrológicos (a , b , q e T) 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).

Quando as condições extremas não são estabelecidas, pode-se igualar a equação 4.10 à equação 4.4 para realizar uma junção entre o modelo de estabilidade de talude infinito com o modelo hidrológico de regime permanente (Equação 4.13).

$$\frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \text{sen} \theta} = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \quad (\text{Equação 4.13})$$

Ao reescrever a equação 4.13 em função de q/T (rácio hidrológico em m^{-1}), obtém-se a formulação final adoptada pelo programa SHALSTAB (Equação 4.14).

$$\frac{q}{T} = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \frac{b}{a} \text{sen} \theta \quad (\text{Equação 4.14})$$

A relação hidrológica q/T (Equações 4.4 e 4.14) equivale à magnitude da precipitação de um dado evento, representada por q , relativamente à capacidade para transportar a água ao longo de um talude para um dado gradiente (i.e. transmissividade). Assim, quanto maior for a relação q/T , a menor profundidade se encontra o nível freático e, conseqüentemente, dependendo do declive, haverão mais locais que se tornam instáveis, ou seja, a relação h/z da equação 4.4 excede o da equação 4.10 (Dietrich et al., 2001).

A partir da equação 4.14 também se pode definir a recarga efectiva crítica (q_{crit}) a partir da qual existe a possibilidade de ocorrência de instabilidade (Equação 4.15).

$$q_{crit} = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} T \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \frac{b}{a} \text{sen} \theta \quad (\text{Equação 4.15})$$

Em função dos parâmetros descritos acima, são estabelecidas classificações do terreno segundo o grau de estabilidade. Os autores propõem originalmente sete classes distintas de estabilidade, redefinidas neste estudo para quatro classes (Tabela 4.1), sendo que as duas classes extremas são referentes à satisfação das equações 4.11 e 4.12, e representam áreas incondicionalmente instáveis e estáveis, respectivamente (Damacena et al., 2005). A estabilidade de uma célula que não satisfaça as condições das classes extremas é definida em função da equação 4.14.

Tabela 4.1 - Classes de estabilidade (adaptado de Dietrich & Montgomery, 1998; Michel et al., 2012)

Classe de estabilidade	Condição
Incondicionalmente estável	$\tan \theta \leq \tan \varphi \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_h}\right)$
Estável	$\frac{a}{b} < \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}\right) \frac{T}{q} \sin \theta$
Instável	$\frac{a}{b} \geq \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}\right) \frac{T}{q} \sin \theta$
Incondicionalmente instável	$\tan \theta > \tan \varphi$

O modelo distingue ainda as áreas tidas como saturadas (Equação 4.16) e não saturadas (Equação 4.17), embora estas não tenham expressão na avaliação da estabilidade.

$$\frac{a}{b} > \frac{T}{q} \sin \theta \quad (\text{Equação 4.16})$$

$$\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \theta \quad (\text{Equação 4.17})$$

O output do programa SHALSTAB é definido em termos do logaritmo da relação da recarga efectiva pela transmissividade do solo. Dietrich & Montgomery (1998) propõem assim classes de estabilidade a partir de valores de $\log(q/T)$ previamente estabelecidos (Tabela 4.2). A definição de “estabilidade” para as classes $\log(q/T)$ dependem das características do terreno e são, assim, definidas pelo utilizador. As classes “instabilidade crónica” e “estável” correspondem às classes “incondicionalmente instável” e “incondicionalmente estável” da Tabela 4.1, respectivamente, consideradas neste estudo como classes extremas.

Tabela 4.2 - Classes de estabilidade utilizadas no modelo de análise SHALSTAB (adaptado de Witt, 2005)

Intervalo $\log(q/T)$	q em mm.dia ⁻¹ para T = 25 m ² .dia ⁻¹	Classes de estabilidade adoptadas
Instabilidade crónica	-	Incondicionalmente instável
$\log(q/T) < -3,4$	$q < 10$	Instabilidade elevada
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	$10 < q < 20$	Instável
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	$20 < q < 40$	Instabilidade moderada
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	$40 < q < 79$	Metaestável
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	$79 < q < 158$	Estabilidade moderada
$\log(q/T) > -2,2$	$q > 158$	Estável
Estável	-	Incondicionalmente estável

4.1.2.2 Modelação determinística com componente estocástica

Neste trabalho, a análise determinística com componente estocástica da avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno é efectuada tendo por base uma adaptação da modelação do programa SINMAP desenvolvido por Pack et al. (1998; 2005). Este modelo tem uma componente estocástica que permite o cálculo de índices de estabilidade em vertentes e, tal como o SHALSTAB, também utiliza o conceito de modelo hidrológico de regime permanente desenvolvido por Beven & Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986), e o modelo de estabilidade de talude infinito.

Também como no programa SHALSTAB, as variáveis topográficas (e.g. declive e área de contribuição) são obtidas através do MDE, a partir do qual se obtém o índice de estabilidade para cada célula separadamente.

O SINMAP faz a classificação da estabilidade do terreno com base na variação espacial do declive e da área de contribuição, e de outros parâmetros hidrológicos e geotécnicos (e.g. recarga efectiva, transmissividade, peso volúmico do solo, etc.). Estes parâmetros ligados ao solo e à precipitação 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, rácio hidrológico 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). Onde os parâmetros mais conservativos (desestabilizadores) resultam, ainda assim, em estabilidade, o SI é definido como o FS dessa célula. Isto é verdade para valores de SI superiores a 1.

A Tabela 4.3 apresenta as classes de estabilidade definidas por Pack et al. (1998; 2005). No entanto, os autores referem que os limites de cada classe podem ser mudados consoante as características de cada região.

Na Tabela 4.3, os termos “incondicionalmente estável”, “estabilidade moderada” e “metaestável” classificam zonas onde, de acordo com o modelo, não deve ocorrer rotura do talude com os parâmetros mais conservadores pertencentes à gama de valores especificada. Neste caso, o SI é o factor de segurança que fornece uma medida da magnitude dos factores desestabilizadores, como por exemplo, numa dada situação em que existe um incremento do teor em água devido à rotura do sistema de drenagem de uma estrada (Pack et al., 2005).

Tabela 4.3 - Classes de estabilidade do programa SINMAP (adaptado de Pack et al., 2005; Michel et al., 2012)

Índice de estabilidade	Estado previsto	Estabilidade esperada	Possível influência de factores não modelados
SI > 1,5	Incondicionalmente estável	Instabilidade não prevista	São necessários factores desestabilizadores significativos para gerar instabilidade
1,5 > SI > 1,25	Estabilidade moderada	Instabilidade não prevista	São necessários factores desestabilizadores moderados para gerar instabilidade
1,25 > SI > 1	Metaestável	Instabilidade não prevista	Apenas são necessários factores desestabilizadores mínimos para gerar instabilidade
1 > SI > 0,5	Limiar inferior de instabilidade	Combinação pessimista prevê instabilidade	Factores desestabilizadores não são necessários para gerar instabilidade
0,5 > SI > 0	Limiar superior de instabilidade	Combinação optimista prevê estabilidade	Factores estabilizadores podem eventualmente gerar estabilidade
SI < 0	Incondicionalmente instável	Estabilidade não prevista	Factores estabilizadores são imprescindíveis para gerar estabilidade

Os termos “limiar inferior de instabilidade” e “limiar superior de instabilidade” referem-se a zonas onde, a probabilidade de instabilidade é inferior ou superior a 50%, respectivamente. Nestas zonas, não são necessários factores externos para provocar instabilidade. A instabilidade pode simplesmente surgir devido à combinação de parâmetros cujos valores pertencem a uma gama previamente estabelecida e cuja variabilidade pode ser quantificada (op. cit.).

O termo “incondicionalmente instável” caracteriza zonas que, de acordo com o modelo, são instáveis para qualquer parâmetro dentro da gama de valores especificada. Tal ocorre em zonas onde o modelo é aplicado inadequadamente, como no caso de existirem zonas com afloramentos rochosos (op. cit.).

Tal como o programa SHALSTAB, a modelação do programa SINMAP junta o modelo de estabilidade de talude infinito (Equação 4.3) com a fórmula final do modelo hidrológico de regime permanente (Equação 4.4), dando origem à equação 4.13. A diferença entre ambos os softwares é que a “humidade” considerada neste caso é a relativa, expressa pela equação 4.8, obtendo-se a formulação final do método SINMAP (Equação 4.18), em que FS é uma medida adimensional da estabilidade. Neste trabalho optou-se por utilizar a formulação sem o valor da coesão para se poder proceder, posteriormente, a uma comparação dos resultados com os obtidos através do método SHALSTAB.

$$FS = \frac{\cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{q}{r_b \sin \theta}, 1 \right) \frac{\gamma_w}{\gamma_h} \right] \tan \varphi}{\sin \theta} \quad (\text{Equação 4.18})$$

Na equação 4.18, o quociente quantifica a contribuição do atrito interno para a estabilidade. Este contributo é reduzida pelo incremento do teor em água devido ao aumento da pressão intersticial. A sensibilidade deste efeito é controlada pela relação γ_w/γ_h (op. cit.).

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 definidos pelo utilizador, $\tan\phi$ e q/T , estão associados a uma incerteza, logo, o modelo trabalha em termos de limites máximos e mínimos para estes parâmetros.

Sendo $q/T = x$ e $\tan\phi = t$, tem-se, com uma distribuição uniforme com limites inferiores e superiores, que:

$$x \sim U(x_1, x_2) \quad (\text{Equação 4.19})$$

$$t \sim U(t_1, t_2)$$

Assim, o menor valor de t (i.e. t_1), combinado com o maior valor de x (i.e. x_2) 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 factor de segurança mínimo (FS_{\min}) superior a 1, são tidas como incondicionalmente estáveis (Equação 4.20) (op. cit.).

$$FS_{\min} = \frac{\cos \theta \left[1 - \min\left(x_2 \frac{a}{b \sin \theta}\right) \frac{\gamma_w}{\gamma_h} \right] t_1}{\sin \theta} \quad (\text{Equação 4.20})$$

No caso em que $FS_{\min} > 1$, é assumido que, dado os parâmetros mais conservativos, o modelo continua a devolver $FS > 1$. Logo, o SI, definido como mínimo factor de segurança determinístico, tem o seu valor máximo (Equação 4.21).

$$SI = Prob(FS > 1) = 1 \quad (\text{Equação 4.21})$$

Para áreas onde o factor de segurança mínimo é inferior a 1, existe a possibilidade (i.e. probabilidade) de rotura do talude. Esta possibilidade de rotura é devida à variabilidade espacial de $\tan\phi$ e T . A probabilidade também comporta uma componente temporal pois q caracteriza um teor em água que varia no tempo. Assim, a incerteza em x combina probabilidades espaciais e temporais. Nestas áreas, com $FS_{\min} < 1$, define-se o índice de estabilidade como:

$$SI = Prob(FS > 1) \text{ com } 0 < SI < 1 \quad (\text{Equação 4.22})$$

O programa SINMAP calcula o índice de estabilidade SI (para $0 < SI < 1$) com recurso às diversas equações probabilísticas que o MS Excel não tem capacidade de efectuar. Assim, neste trabalho, o cálculo de SI é efectuado com a seguinte equação:

$$SI = \frac{\cos \theta \left[1 - \min\left(x \frac{a}{b \sin \theta}\right) \frac{\gamma_w}{\gamma_h} \right] t}{\sin \theta} \quad (\text{Equação 4.23})$$

O melhor cenário acontece quando se combina o maior valor de t (i.e. t_2) com o menor valor de x (i.e. x_1).

$$FS_{max} = \frac{\cos \theta \left[1 - \min \left(x_1 \frac{a}{b \operatorname{sen} \theta} \right) \frac{\gamma_w}{\gamma_h} \right] t_2}{\operatorname{sen} \theta} \quad (\text{Equação 4.24})$$

Para este melhor cenário, se $FS_{max} < 1$, então a área é tida como incondicionalmente instável e:

$$SI = \operatorname{Prob}(FS > 1) = 0 \quad (\text{Equação 4.25})$$

A Figura 4.4 resume a metodologia adoptada neste estudo para a avaliação determinística com componente estocástica, baseada no programa SINMAP.

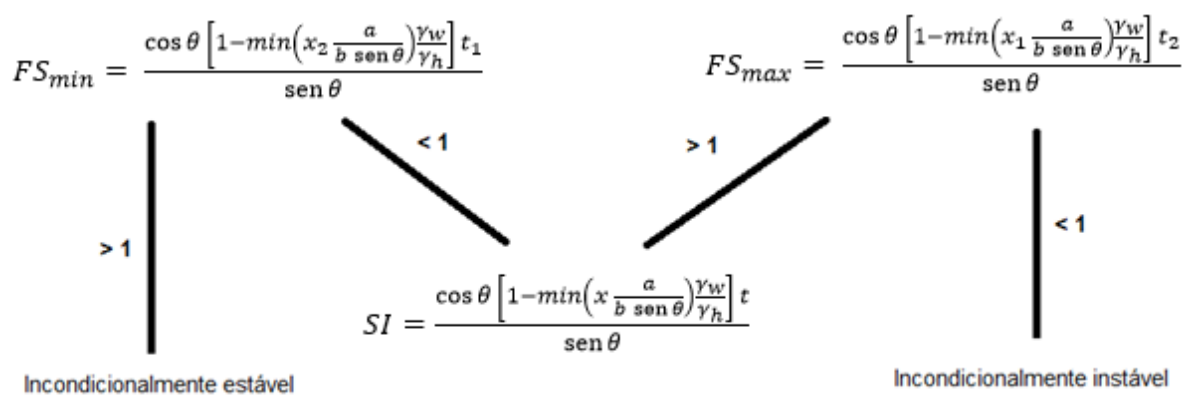


Figura 4.4 – Metodologia adoptada neste estudo para a avaliação determinística com componente estocástica

4.2 PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS

Os programas SHALSTAB e SINMAP partilham alguns parâmetros específicos que devem ser introduzidos de modo a otimizar os modelos para as condições locais de precipitação e características geológico-geotécnicas. De seguida são apresentados os dados de entrada, utilizados neste estudo, referentes à topografia, às características geotécnicas e hidrogeológicas do solo e à precipitação.

Os 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_s , o ângulo de atrito φ , a transmissividade do solo T e a recarga efectiva q (Dietrich et al., 2001).

4.2.1 Parâmetros topográficos

Os programas necessitam de um MDE como base para a modelação. Neste trabalho foi utilizado um MDT com células de 5×5 metros da área de estudo, fornecido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Procedeu-se à criação de um MDT corrigido, através da função *Fill* do programa ArcGIS 10.0. Esta função elimina zonas de depressões no MDT, removendo assim pequenas imperfeições que possam ter sido criadas na preparação deste.

De seguida, a partir do MDT corrigido, foram criados dois outros representando o declive e a direcção de fluxo. Para tal, foram utilizadas as funções *Slope* e *Flow direction* do ArcGIS, respectivamente. O mapa do declive em graus (θ) da área em estudo foi exportado para o programa MS Excel para se proceder à aplicação dos cálculos em cada célula. A representação planimétrica do declive é apresentada no mapa do declive exposto na Figura 4.5.

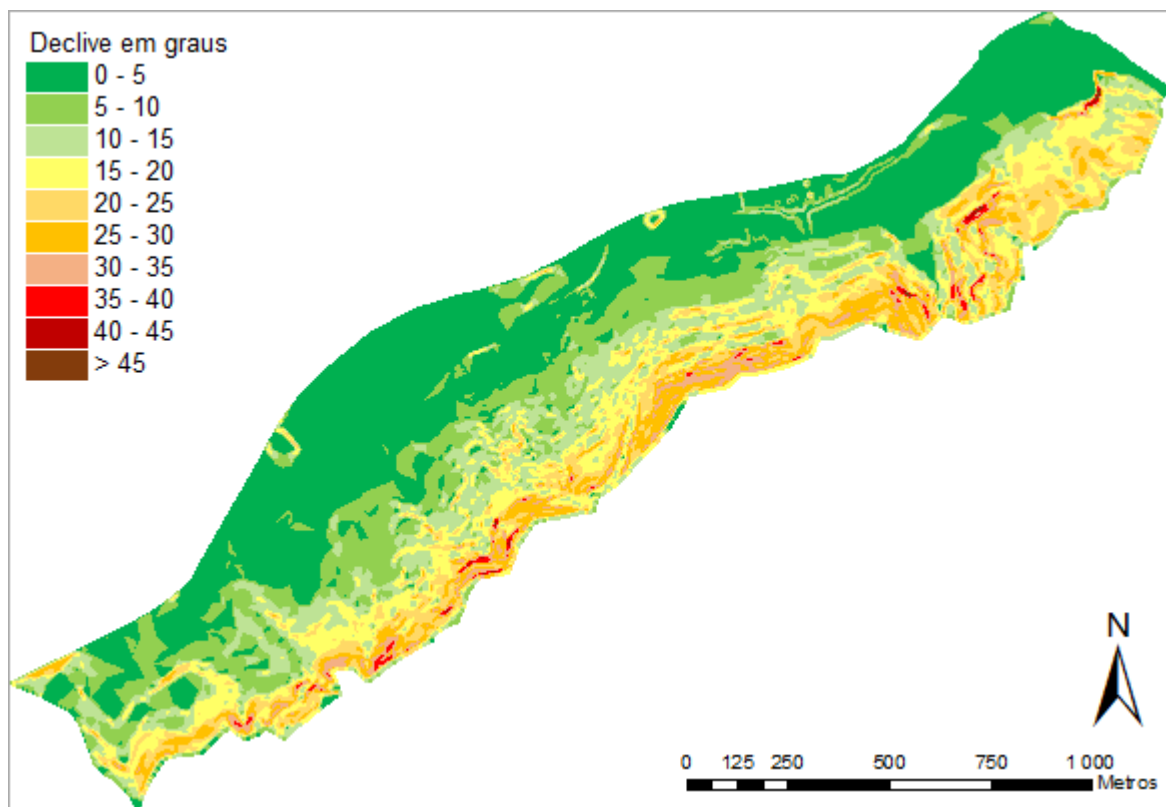


Figura 4.5 - Mapa do declive da área em estudo

Finalmente, com o mapa da direcção de fluxo e a partir da função *Basin* do ArcGIS, obteve-se um mapa contendo as bacias de drenagem da zona em estudo. Os dados referentes a este mapa foram exportados para o MS Excel, considerando apenas sete áreas de contribuição para a área estudada (Figura 4.6).

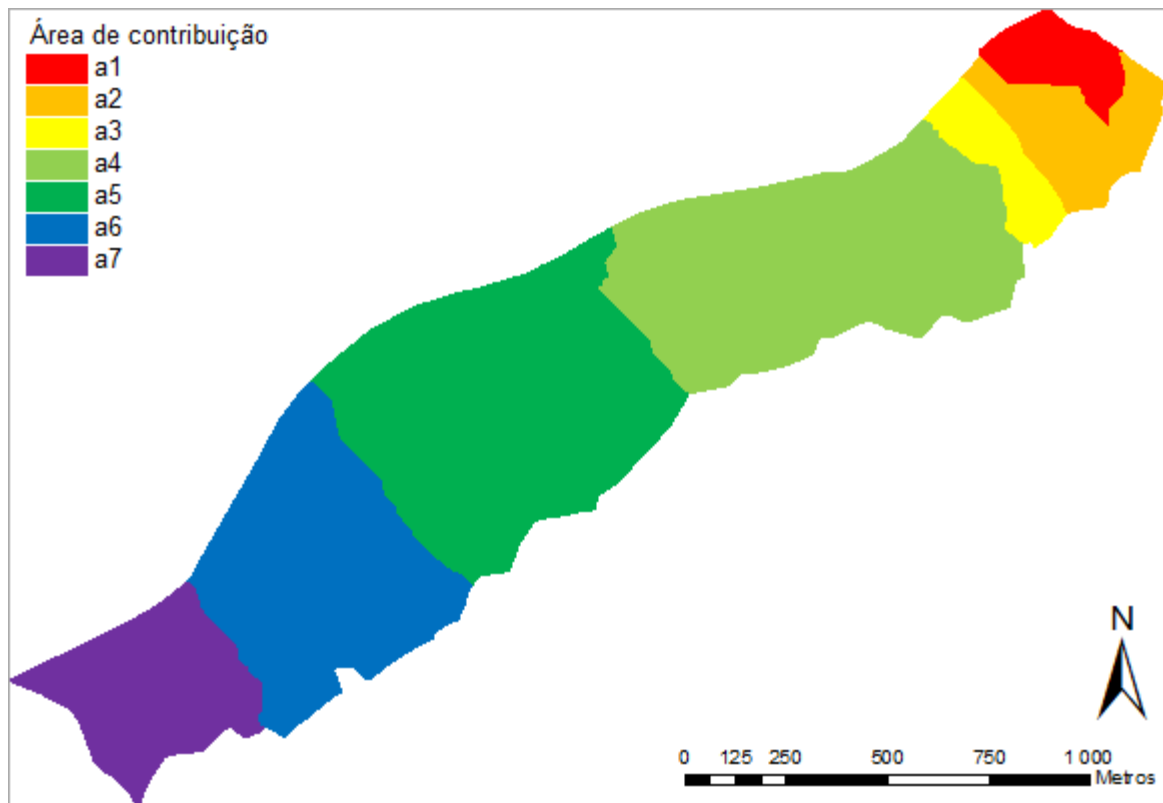


Figura 4.6 - Mapa das áreas de contribuição da zona de estudo

A partir destes dados, foi possível calcular as áreas de contribuição a , os respectivos comprimentos dos trechos de descarga b e as áreas de contribuição específica A (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Dados obtidos para as bacias de drenagem

Zona	a (m ²)	b (m)	A (m ² .m ⁻¹)
1	53 950	499	108
2	93 875	280	335
3	54 200	355	153
4	420 150	770	546
5	453 075	918	494
6	312 650	600	521
7	164 900	510	323

4.2.2 Parâmetros do solo

As características do solo exercem grande influência na estabilidade das vertentes pois são elas que ditam as respectivas resistências e a capacidade de transmissão da água proveniente da recarga directa. Os dados referentes ao solo, ou seja, os parâmetros geotécnicos e hidrogeológicos, foram obtidos na bibliografia existente (Sousa, 2013; Tecnasol, 2002 apud Sousa, 2013; Simões, 1998).

a) Ângulo de atrito e peso volúmico húmido

Os valores referentes ao ângulo de atrito e ao peso volúmico do solo foram obtidos por Sousa (2013) e pela empresa Tecnasol (2002 apud Sousa, 2013), apresentados na Tabela 4.5. Os valores de ângulo de atrito apresentados pela Tecnasol referem-se a valores obtidos para as zonas geotécnicas, estimadas pela empresa, Z2 e Z3. A zona geotécnica Z1, com valores de ângulo de atrito entre 32° e 35°, não foi considerada, pois esta apenas aparece em regra a profundidades superiores do que aquelas que são consideradas neste trabalho.

Tabela 4.5 - Dados do ângulo de atrito e do peso volúmico húmido do solo

	Ângulo de atrito (°)	Peso volúmico húmido (kN.m ⁻³)
Sousa (2013)	22,0 e 33,7	19,7 e 22,7
Tecnasol (2002, apud Sousa, 2013)	28 a 32	19 a 21

b) Transmissividade

Não foi possível efectuar 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 L.s⁻¹.m⁻¹. Desta forma, o valor de transmissividade médio considerado foi de 25 m².dia⁻¹, ou seja, cerca de 2,90×10⁻⁴ m².s⁻¹.

4.2.3 Parâmetros de precipitação

As técnicas de análise adoptadas neste trabalho avaliam a probabilidade de ocorrência de instabilidade de vertentes recorrendo aos parâmetros geotécnicos e hidrogeológicos do solo em estudo. Como a precipitação actua como factor desencadeante de instabilidades, os cálculos realizados neste trabalho são então apresentados em função da recarga efectiva diária.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de precipitação máxima diários registados anualmente, na zona em estudo, para a sequência de 2001-2012, e os respectivos comentários elaborados pelas autoras. Como seria de esperar, estes valores tendem geralmente a ser mais elevados para os meses de Outono e de Inverno. O máximo de precipitação diária registado neste período foi no dia 18 de Fevereiro de 2008 com o valor de 102 mm e uma precipitação máxima horária de 39 mm. Já a 6 de Dezembro de 2012, o valor máximo de precipitação diária foi de 91 mm, com uma precipitação máxima horária de 19 mm (Jorge & Ramos, 2012).

Tabela 4.6 - Valores registados pelo Instituto D. Luiz de precipitação máxima diária no período de 2001 a 2012 (Jorge & Ramos, 2012)

Ano	Máximo de precipitação diária (mm)	Data	Sequência de dias de precipitação
2001	52	28 Out	Valor isolado
2002	47	14 Nov	Vários dias seguidos, mas com valores mais baixos a muito mais baixos
2003	45	21 Nov	Valor praticamente isolado
2004	86	29 Jan	3 dias
2005	58	20 Nov	Precipitação não intensa em vários dias
2006	73	24 Nov	6 dias, mas valores bastante mais baixos
2007	58	20 Nov	5 dias, os 3 últimos com precipitação não muito intensa
2008	102	18 Fev	3 dias, o anterior e o posterior com precipitação muito pouco intensa, comparativamente
2009	53	20 Out	2 dias de precipitação mais intensa e o 3.º com precipitação muito pouco intensa
2010	80	15 Fev	Quase 2 semanas, mas com pequenas interrupções e com valores de precipitação muito menores
2011	57	2 Nov	4 dias, mas os restantes com muito menos precipitação
2012	91	6 Dez	Nas duas semanas anteriores há precipitações diárias significativas, mas também há dias sem precipitação

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 (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Valores de precipitação associados a instabilidades superficiais ocorridas a Norte de Lisboa no período de 1956 a 2001 (adaptado de Zêzere et al., 2005)

Data	Precipitação acumulada mm (duração em dias)	Intensidade da precipitação em mm.dia⁻¹	Período de retorno em anos
19 Dez 1958	149 (10)	14,9	2,5
9 Mar 1959	175 (10)	17,5	4
15 Nov 1967	137 (1)	137	60
4 Mar 1978	204 (15)	13,6	3,5
30 Dez 1981	174 (5)	34,7	13
18 Nov 1983	164 (1)	164	200
25 Fev 1987	52 (1)	52	2
22 Nov 1989	164 (15)	11	2
25 Nov 1989	217 (15)	14,4	4,5

É possível verificar na Tabela 4.7, 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 efectiva que abrangessem a gama de valores de precipitação máxima diária já registados para essa área. Os cálculos de instabilidade foram então efectuados para valores de q iguais a 10, 20, 50, 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 ZONAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE NA ÁREA EM ESTUDO

De seguida apresentam-se os resultados de aplicação das duas metodologias adoptadas: determinística absoluta e determinística com componente estocástica. Ao todo são 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.

Deve ser tido em conta que os resultados apresentados não utilizam parâmetros tais como o uso do solo. Sendo 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.

5.1.1 Modelação determinística absoluta

Na avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno por modelação determinística absoluta, foram efectuados três 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 (Tabela 4.2). De seguida, são apresentados os dados referentes à estabilidade do terreno, de acordo com a Tabela 4.1, para cada recarga efectiva definida no subcapítulo 4.2. Por fim, é apresentada a recarga efectiva crítica para que haja rotura em cada célula (Equação 4.15).

Nesta modelação consideram-se 17 cenários diferentes. Em cada cenário é variado o peso volúmico do solo e o ângulo de atrito, de acordo com os valores retirados da bibliografia existente. Os cenários 1 a 15 têm por base os valores de peso volúmico húmido e de ângulo de atrito do solo obtidos pela Tecnasol (2002 apud Sousa, 2013) (Tabela 5.1). Os valores daqueles parâmetros geotécnicos que caracterizam os cenários 16 ($\gamma_h = 22,7 \text{ kN.m}^{-3}$ e $\phi = 33,7^\circ$) e 17 ($\gamma_h = 19,7 \text{ kN.m}^{-3}$ e $\phi = 22,0^\circ$) referem-se aos valores obtidos por Sousa (2013) na zona em estudo.

Tabela 5.1a - Designação dos vários cenários em função dos valores do peso volúmico húmido do solo e do ângulo de atrito

		Ângulo de atrito (°)				
		28	29	30	31	32
Peso volúmico húmido (kN.m^{-3})	19	12	13	2	14	15
	20	4	5	1	6	7
	21	8	9	3	10	11

Tabela 5.1b - Visualização alternativa dos vários cenários em função dos valores do peso volúmico húmido do solo e do ângulo de atrito

Cenários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
φ (°)	30	30	30	28	29	31	32	28	29	31	32	28	29	31	32
γ_h (kN.m ⁻³)	20	19	21	20	20	20	20	21	21	21	21	19	19	19	19

No corpo do texto são apenas apresentados os mapas e os valores referentes aos cenários 1, 16 e 17, por serem obtidos por uma combinação de características que representa, em termos de estabilidade, o cenário médio, o melhor e o pior, respectivamente. Os dados referentes aos cenários 2 a 15 encontram-se em anexo (Anexo I e Anexo II).

5.1.1.1 Estabilidade em função de $\log(q/T)$

Nesta secção é apresentada a estabilidade em função de $\log(q/T)$, ou seja, tal como é apresentada pelo método SHALSTAB (Tabela 4.2).

O Tabela 5.2 indica os valores de $\log(q/T)$ e do rácio hidrológico q/T e o respectivo valor da recarga efectiva requerida para iniciar a instabilização em solos com uma transmissividade de 25 m².dia⁻¹. De acordo com os valores de recarga efectiva para cada limiar $\log(q/T)$, apresentados no Tabela 5.2, estabeleceu-se um critério de classificação para a zona em estudo (Tabela 5.3).

Tabela 5.2 - Valores dos limites das classes de estabilidade em $\log(q/T)$ e da recarga efectiva correspondente

$\log(q/T)$	q/T	q para $T = 25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$ (mm.dia ⁻¹)
-3,4	0,00040	10
-3,1	0,00079	20
-2,8	0,00158	40
-2,5	0,00316	79
-2,2	0,00631	158

Tabela 5.3 – Designações atribuídas às classes de estabilidade $\log(q/T)$ de acordo com as recargas efectivas iniciadoras da instabilidade para $T = 25 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$

Incondicionalmente instável	
$\log(q/T) < -3,4$	Instabilidade elevada
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	Instável
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	Instabilidade moderada
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	Metaestável
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	Estabilidade moderada
$\log(q/T) > -2,2$	Estável
Incondicionalmente estável	

A partir da análise dos mapas das Figuras 5.1 a 5.3, é possível indicar como áreas que apresentam maior estabilidade, para além das incondicionalmente estáveis, as que se encontram situadas na zona nordeste da área de estudo.

A zona sudoeste apresenta menor instabilidade que a zona central, mas ainda assim são áreas consideradas como tendo instabilidade moderada. Contudo, no pior cenário (Figura 5.3), esta zona sudoeste deixa de ter áreas consideradas minimamente estáveis e apresenta apenas, para além de áreas incondicionalmente instáveis, áreas instáveis em que o valor da recarga efectiva que leva à rotura é inferior ou igual a $20 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ (Tabela 5.4). A zona central sul apresenta sempre instabilidade, qualquer que seja o cenário considerado.

Tabela 5.4 – Valores obtidos para as classes de estabilidade $\log(q/T)$ dos cenários 1, 16 e 17, em metros quadrados e percentagem da área total

		Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
		m ²	%	m ²	%	m ²	%
Incondicionalmente instável		44 900	2,9	13 950	0,9	222 850	14,3
$\log(q/T) < -3,4$	Instabilidade elevada	123 450	8,0	51 850	3,3	335 250	21,6
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	Instável	204 375	13,2	148 600	9,6	66 325	4,3
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	Instabilidade moderada	39 100	2,5	33 600	2,2	9 950	0,6
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	Metaestável	13 100	0,8	12 825	0,8	2 750	0,2
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	Estabilidade moderada	0	0,0	300	0,0	0	0,0
$\log(q/T) > -2,2$	Estável	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável		1 127 875	72,6	1 291 675	83,2	915 675	59,0

De acordo com os dados da Tabela 5.4, nenhum dos cenários apresenta zonas consideradas estáveis, ou seja, em que o valor da recarga efectiva necessária para que haja possibilidade de instabilidade é

no mínimo 158 mm.dia^{-1} . Mesmo no melhor cenário considerado (Figura 5.2), apenas uma área de 300 m^2 é considerada como moderadamente estável, em que o valor de recarga efectiva para rotura se situa acima de 79 mm.dia^{-1} . Assim, em qualquer cenário modelado, praticamente toda a área que não seja considerada como incondicionalmente estável, torna-se potencialmente instável para valores de recarga efectiva inferiores a 79 mm.dia^{-1} .

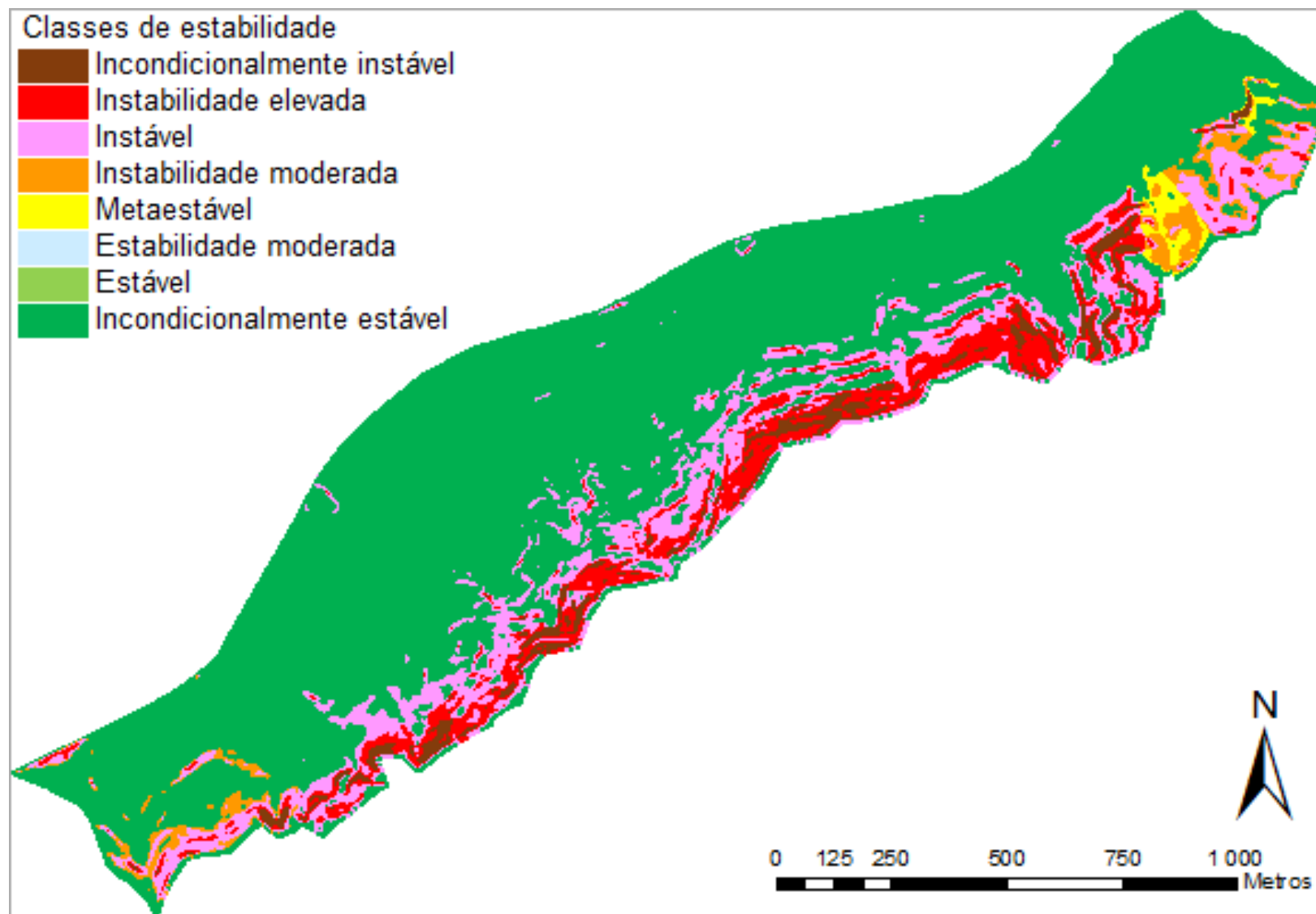


Figura 5.1 - Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para o cenário 1

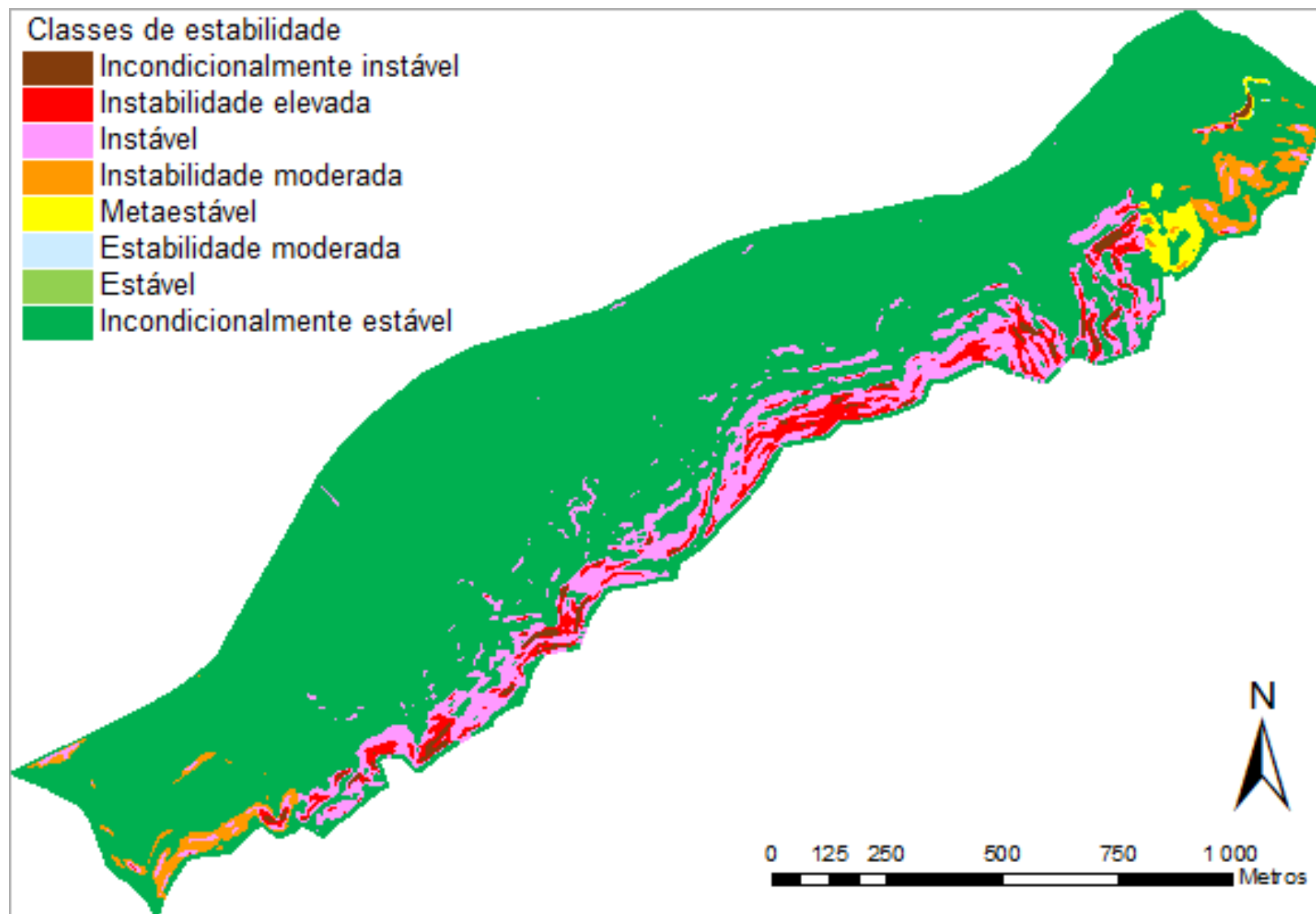


Figura 5.2 - Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para o cenário 16

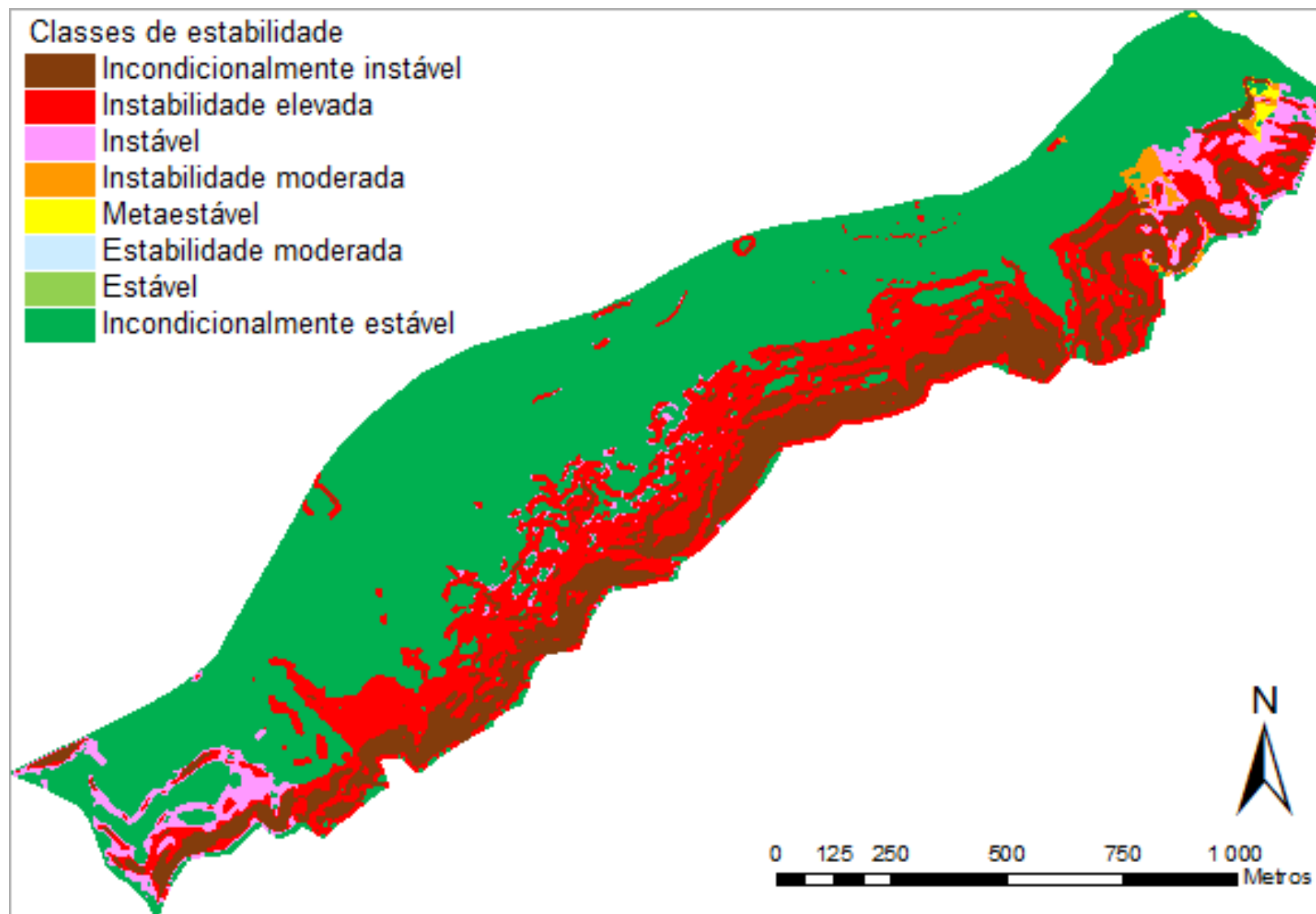


Figura 5.3 - Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ para o cenário 17

5.1.1.2 Avaliação da estabilidade em função da recarga efectiva

A avaliação da estabilidade em função da recarga efectiva é efectuada a partir das equações figuradas na Tabela 4.1. Para cada cenário calculado, variou-se a recarga efectiva nos seguintes valores: 10, 20, 50, 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹. É de salientar que os valores referentes às classes extremas, ou seja, as classes classificadas como incondicionalmente estáveis e instáveis, não sofrem qualquer alteração pois apenas dependem das características geotécnicas do terreno e não do valor da relação q/T .

Para cada cenário, cenários 1, 16 e 17, são apresentados quatro mapas representativos da estabilidade em função das recargas efectivas referidas acima. Os valores obtidos para os restantes cenários encontram-se em anexo (Anexo II). Os mapas referentes às recargas efectivas de $q = 150$ e 200 mm.dia⁻¹ não se apresentam pois, em qualquer cenário considerado, são iguais aos mapas da estabilidade para $q = 100$ mm.dia⁻¹.

a) Cenário 1 – $\gamma_h = 20$ kN.m⁻³; $\varphi = 30^\circ$; $T = 25$ m².dia⁻¹.

As Figuras 5.4 a 5.7 apresentam os mapas da estabilidade para a área de estudo num cenário com parâmetros de peso volúmico e ângulo de atrito do solo médios, de acordo com a metodologia SHALSTAB, para diferentes recargas efectivas.

A Tabela 5.5 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 1, 72,6% (1 127 875 m²) da área estudada apresenta-se como incondicionalmente estável e 2,9% (44 900 m²) como incondicionalmente instável.

As dimensões das áreas que dependem da recarga efectiva, ou seja, as áreas estáveis e instáveis, apresentam uma evolução praticamente nula a partir do valor de recarga efectiva $q = 50$ mm.dia⁻¹.

Tabela 5.5 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade para o cenário 1 em função da recarga efectiva

	q = 10 mm.dia⁻¹		q = 20 mm.dia⁻¹		q = 50 mm.dia⁻¹		q = 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
Incondicionalmente estável	1 127 875	72,6	1 127 875	72,6	1 127 875	72,6	1 127 875	72,6
Estável	256 575	16,5	52 200	3,4	2 025	0,1	0	0,0
Instável	123 450	8,0	327 825	21,1	378 000	24,4	380 025	24,5
Incondicionalmente instável	44 900	2,9	44 900	2,9	44 900	2,9	44 900	2,9

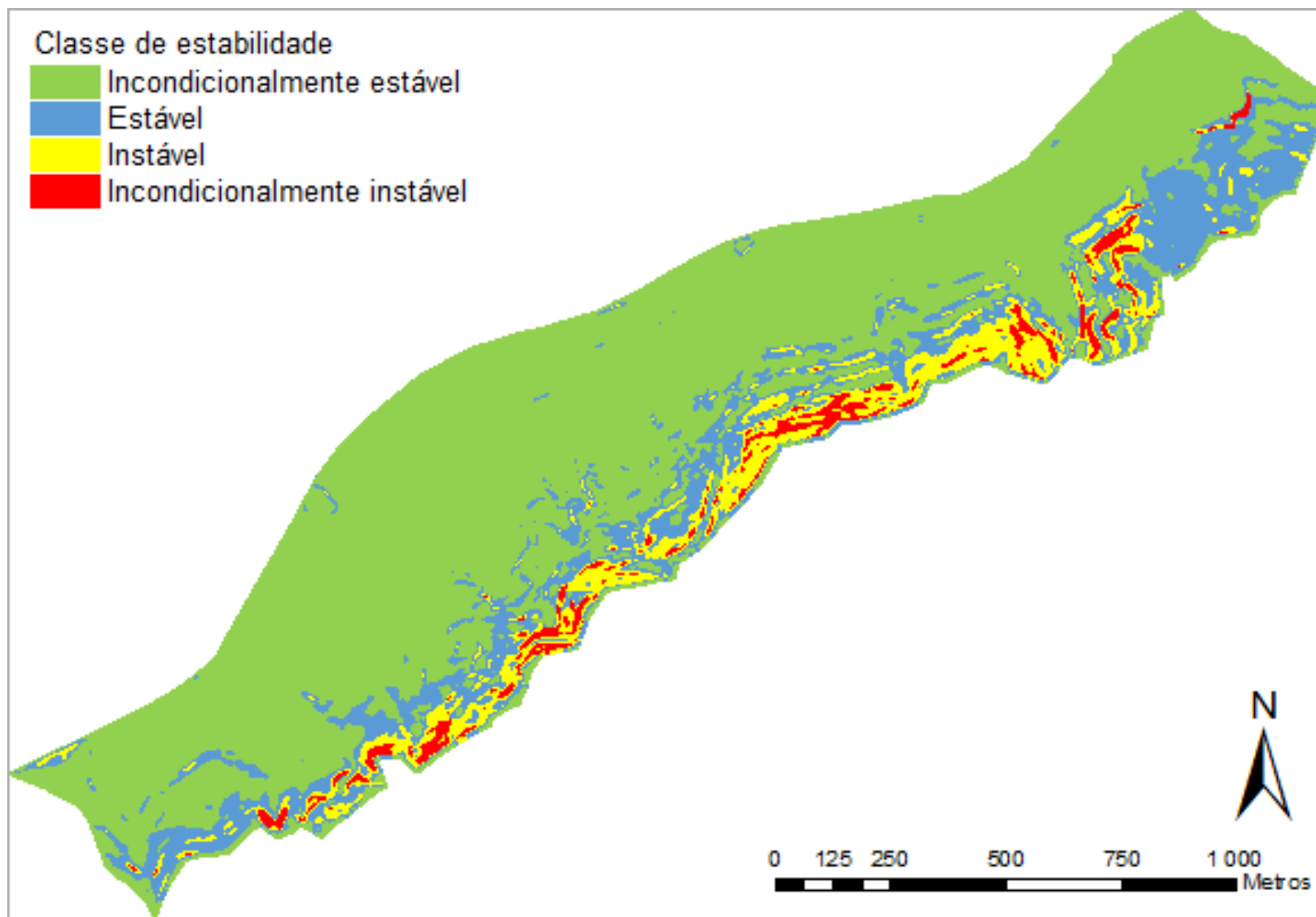


Figura 5.4 – Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1

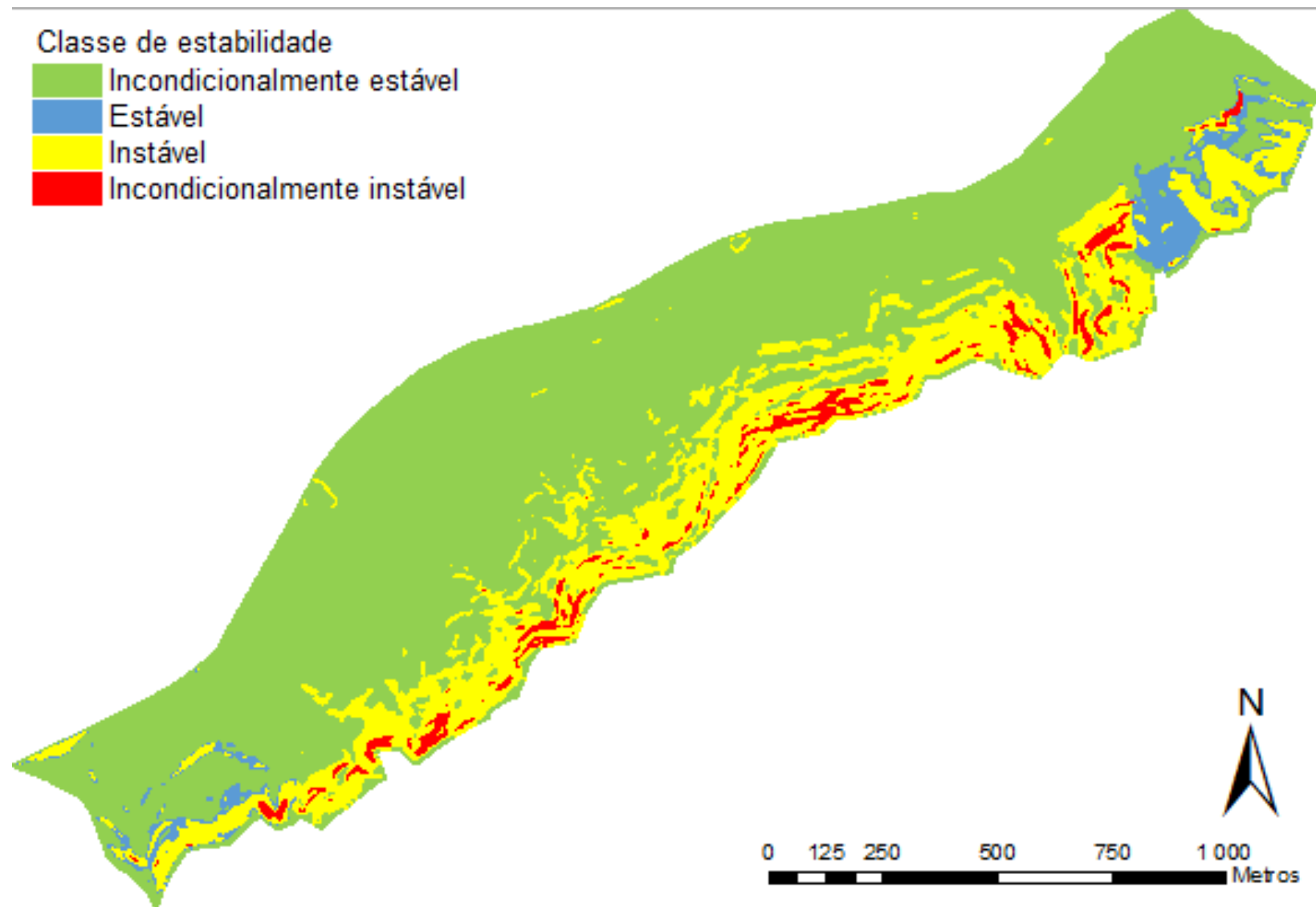


Figura 5.5 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1

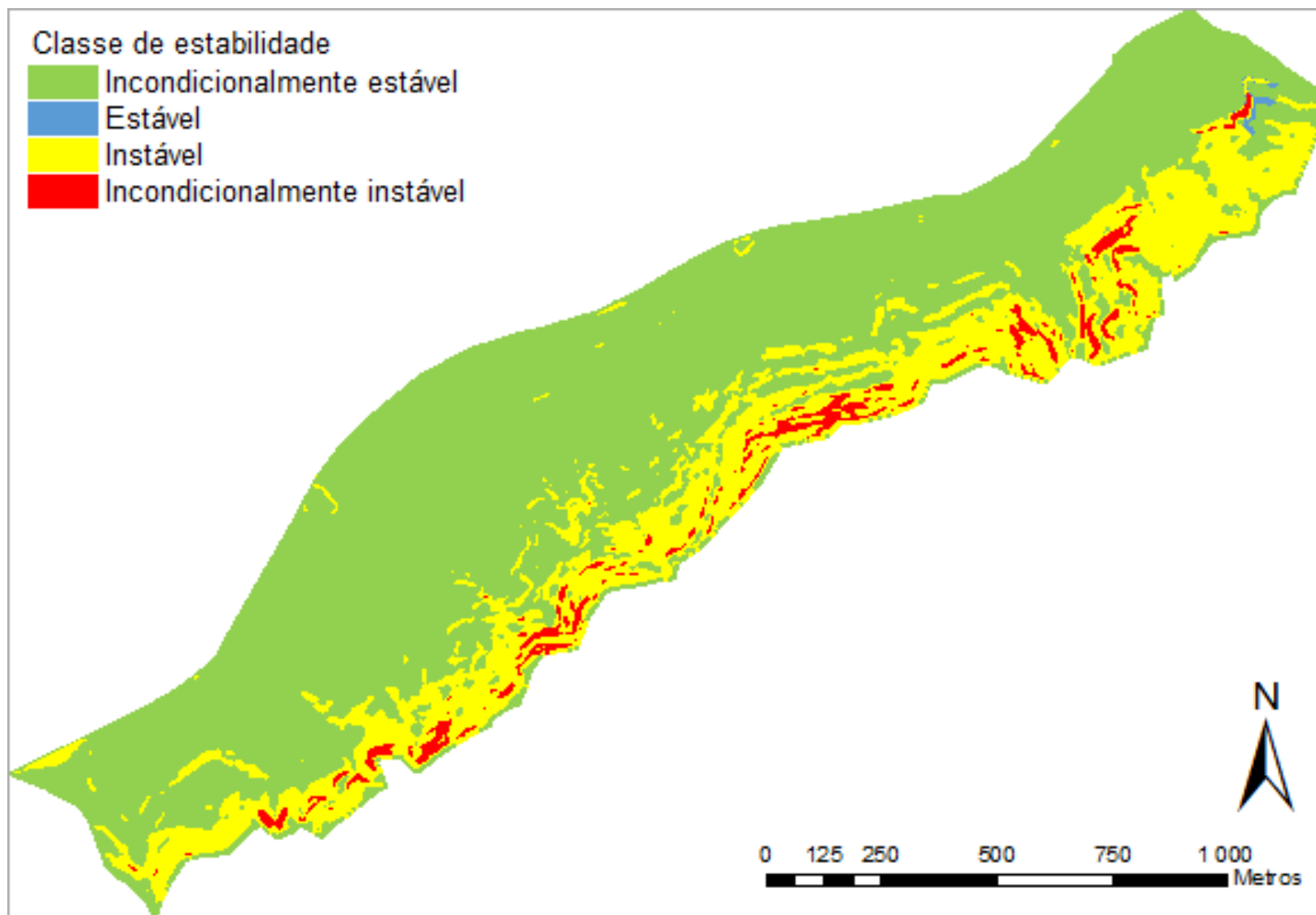


Figura 5.6 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 1

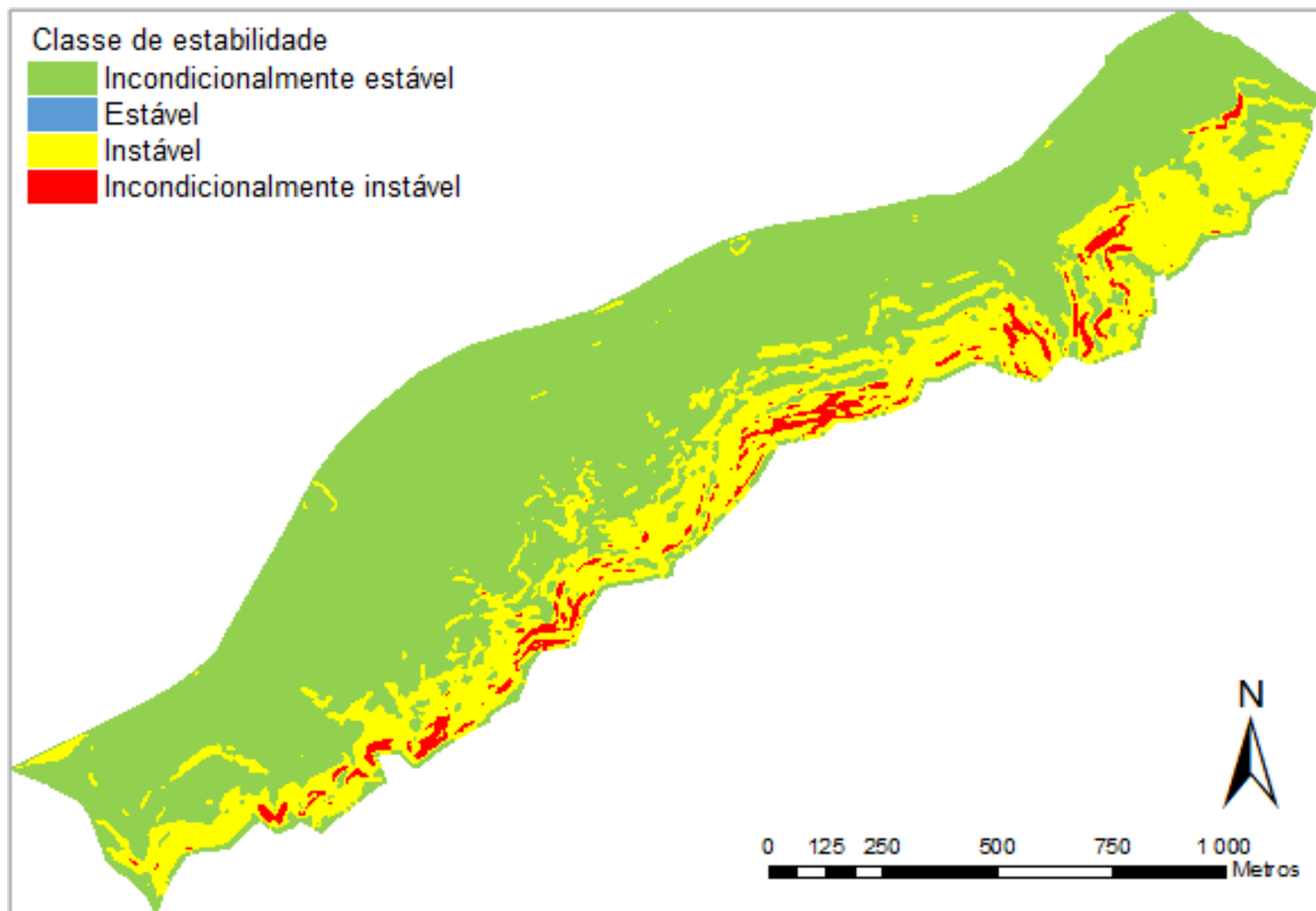


Figura 5.7 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 1

b) Cenário 16 - $\gamma_h = 22,7 \text{ kN.m}^{-3}$; $\phi = 33,7^\circ$; $T = 25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$.

As Figuras 5.8 a 5.11 apresentam o mapa da estabilidade para a área em estudo no melhor cenário considerado, de acordo com a metodologia SHALSTAB, para diferentes recargas efectivas.

A Tabela 5.6 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 1, 83,2% (1 291 675 m²) da área estudada apresenta-se como incondicionalmente estável e 0,9% (13 950 m²) como incondicionalmente instável.

À semelhança do cenário anterior, as dimensões das áreas que dependem da recarga efectiva, ou seja, as áreas estáveis e instáveis, apresentam uma evolução praticamente nula a partir do valor de recarga efectiva $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$. Portanto, neste cenário que apresenta os parâmetros mais optimistas, deixa de haver áreas estáveis na área estudada, para além das “incondicionalmente estáveis”, a partir de valores de recarga efectiva de 50 mm.dia^{-1} .

Tabela 5.6 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade para o cenário 16 em função da recarga efectiva

	q = 10 mm.dia⁻¹		q = 20 mm.dia⁻¹		q = 50 mm.dia⁻¹		q = 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
Incondicionalmente estável	1 291 675	83,2	1 291 675	83,2	1 291 675	83,2	1 291 675	83,2
Estável	195 325	12,6	46 725	3,0	10 250	0,7	0	0,0
Instável	51 850	3,3	200 450	12,9	236 925	15,2	247 175	15,9
Incondicionalmente instável	13 950	0,9	13 950	0,9	13 950	0,9	13 950	0,9

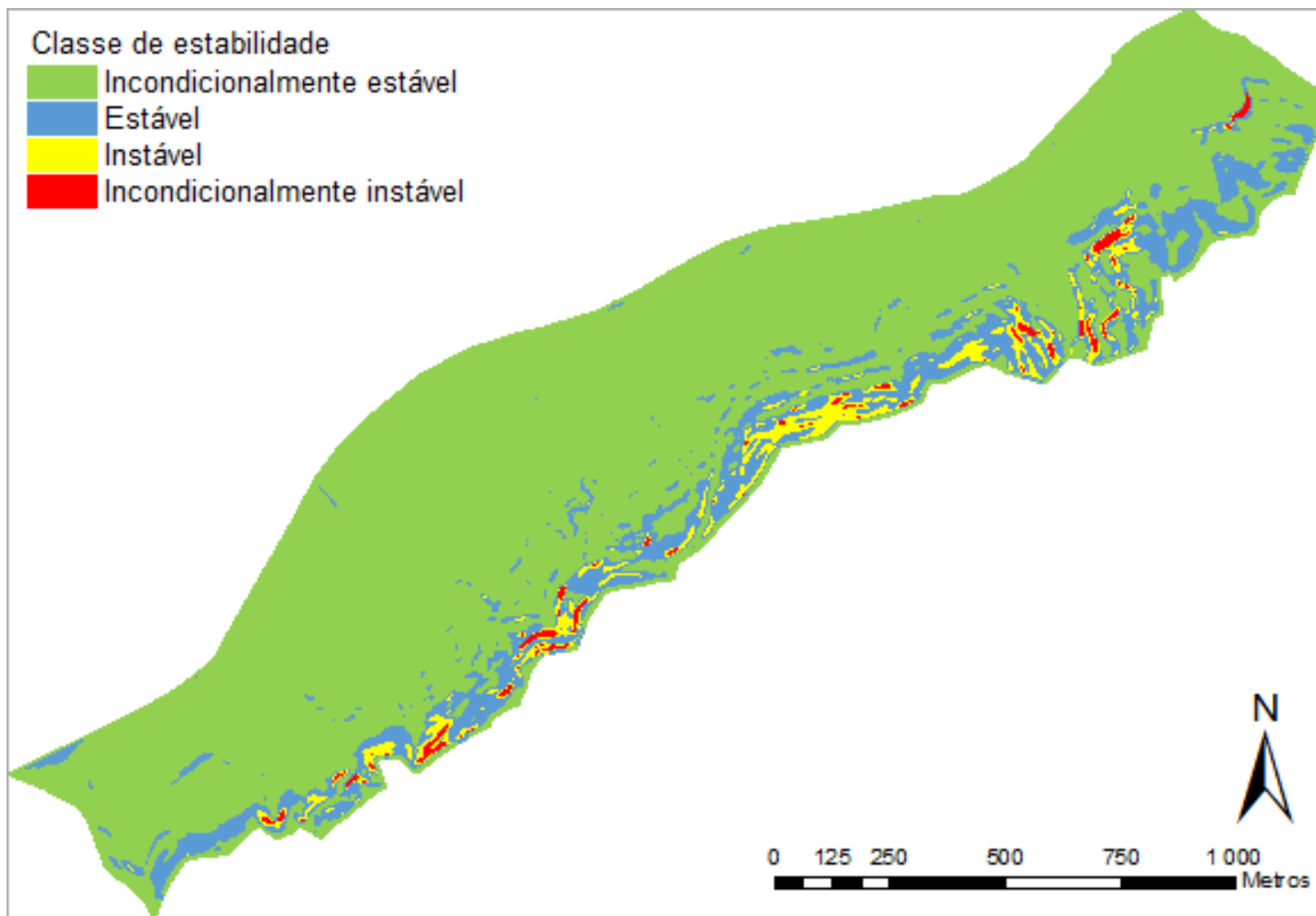


Figura 5.8 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16

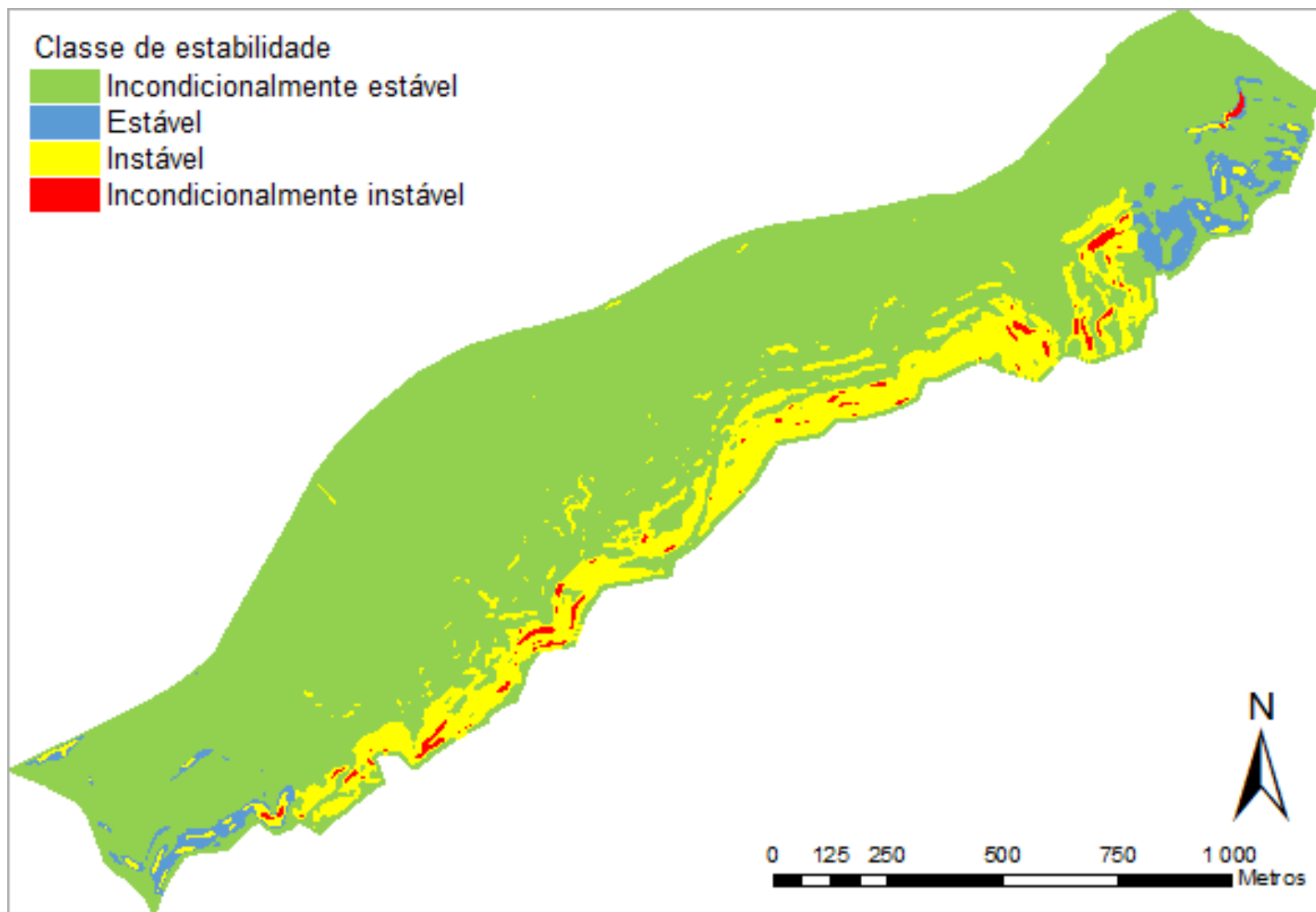


Figura 5.9 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16

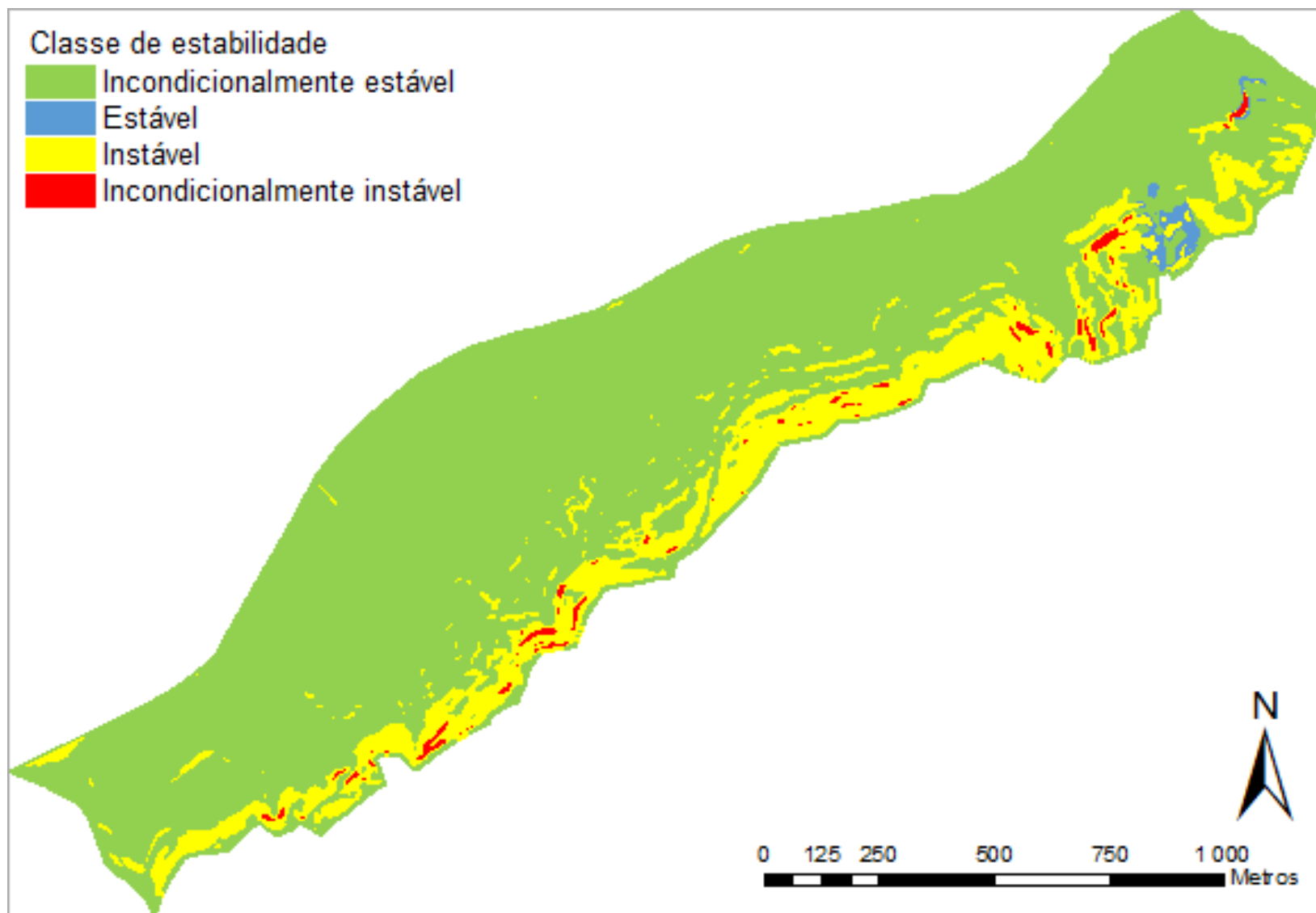


Figura 5.10 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 16

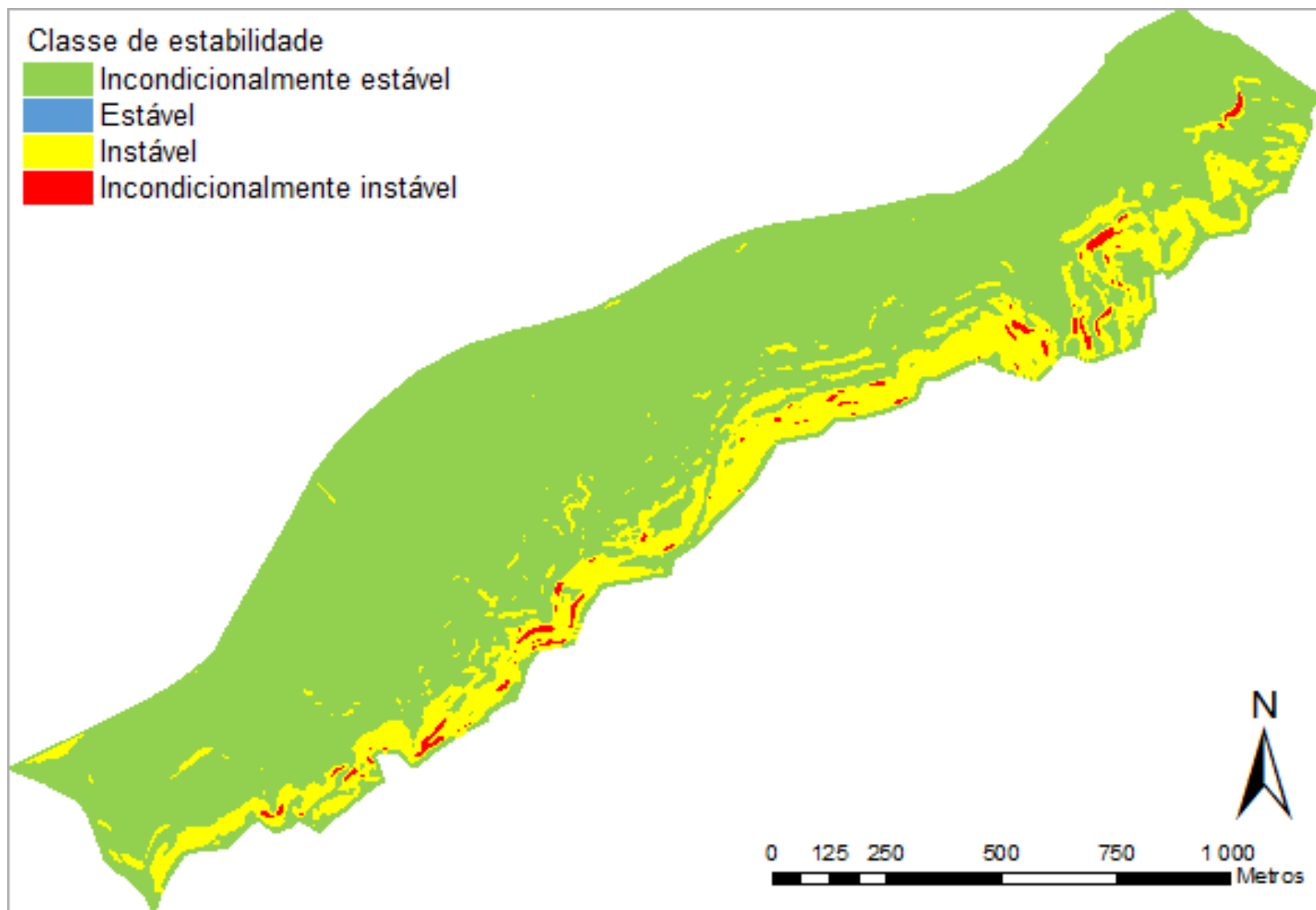


Figura 5.11 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 16

c) Cenário 17 - $\gamma_h = 19,7 \text{ kN.m}^{-3}$; $\varphi = 22,0^\circ$; $T = 25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$.

As Figuras 5.12 a 5.15 apresentam o mapa da estabilidade para área em estudo no pior cenário considerado, de acordo com a metodologia proposta pelo programa SHALSTAB, para diferentes recargas efectivas.

A Tabela 5.7 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 17, 59,0% (915 675 m²) da área estudada apresenta-se como incondicionalmente estável e 14,4% (222 850 m²) como incondicionalmente instável.

Ao contrário dos cenários anteriores, as dimensões das áreas estáveis e instáveis, ou seja, que dependem da recarga efectiva, tendem a estabilizar os seus valores a uma recarga efectiva de 20 mm.dia⁻¹ ao invés de 50 mm.dia⁻¹. Assim, para este cenário que apresenta os parâmetros mais conservadores, a influência da recarga efectiva na estabilidade do terreno é praticamente nula para valores superiores a 20 mm.dia⁻¹.

Tabela 5.7 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade para o cenário 17 em função da recarga efectiva

	q = 10 mm.dia⁻¹		q = 20 mm.dia⁻¹		q = 50 mm.dia⁻¹		q = 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
Incondicionalmente estável	915 675	59,0	915 675	59,0	915 675	59,0	915 675	59,0
Estável	79 025	5,1	12 700	0,8	0	0,0	0	0,0
Instável	335 250	21,5	401 575	25,8	414 275	26,6	414 275	26,6
Incondicionalmente instável	222 850	14,4	222 850	14,4	222 850	14,4	222 850	14,4

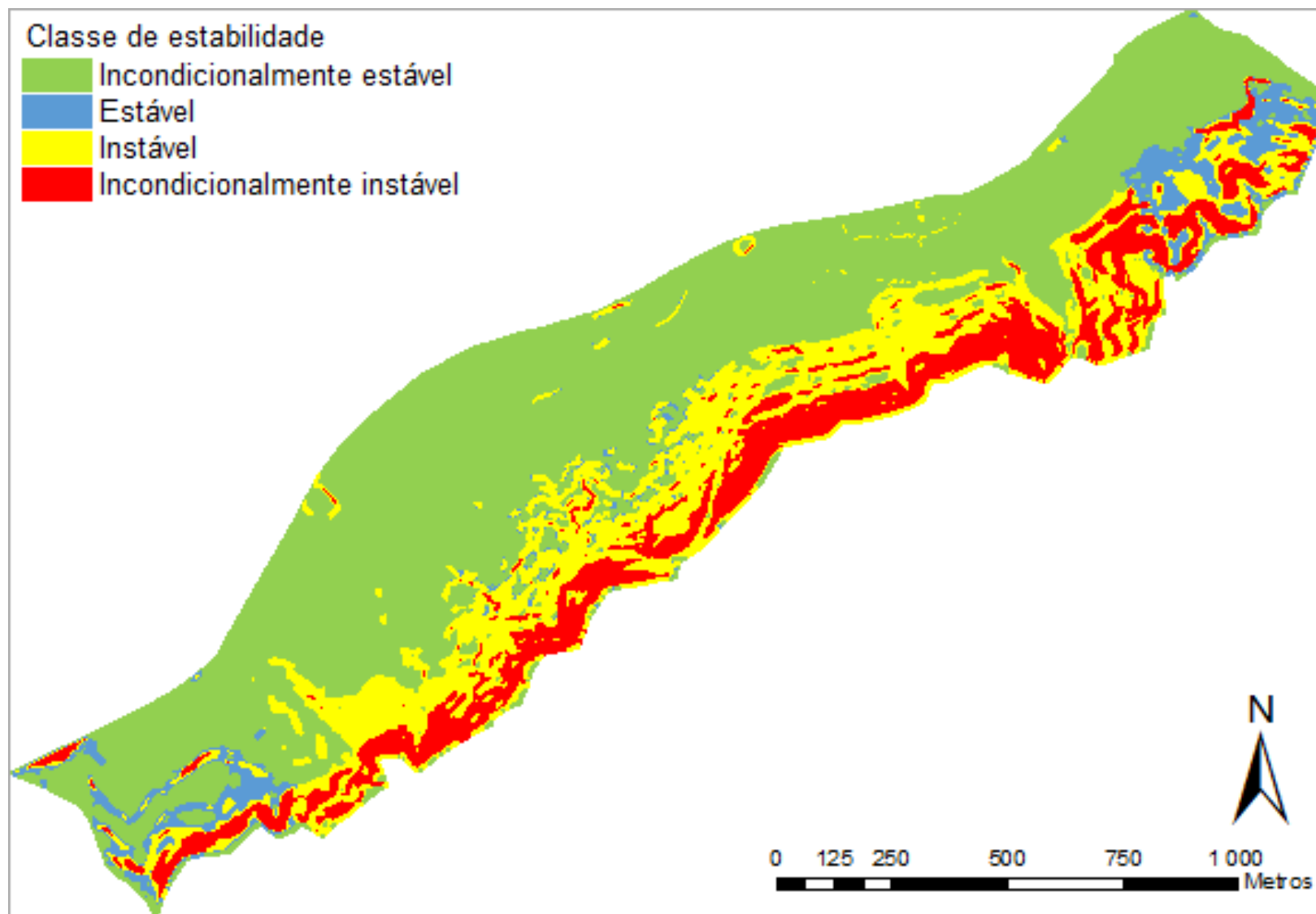


Figura 5.12 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17

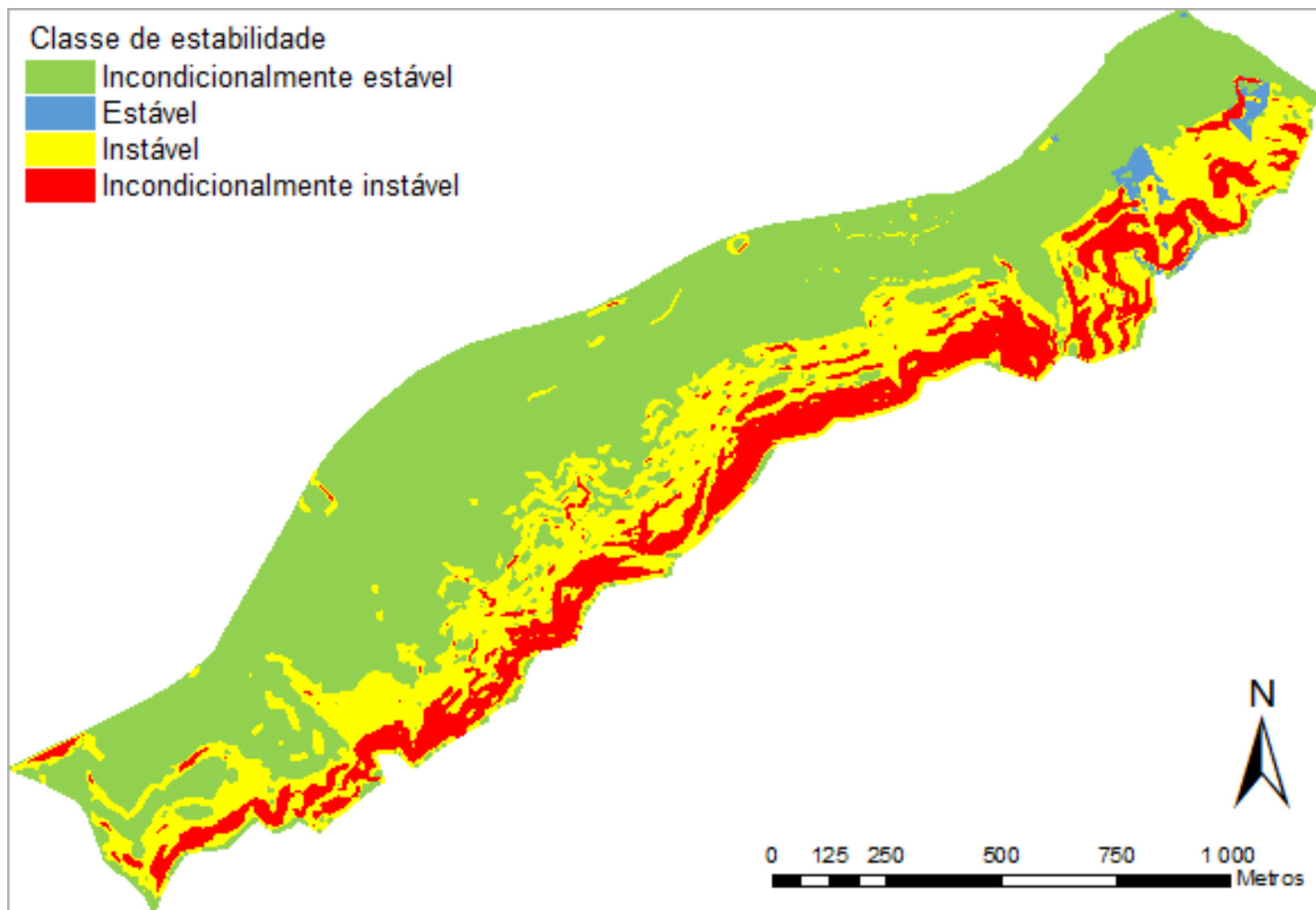


Figura 5.13 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17

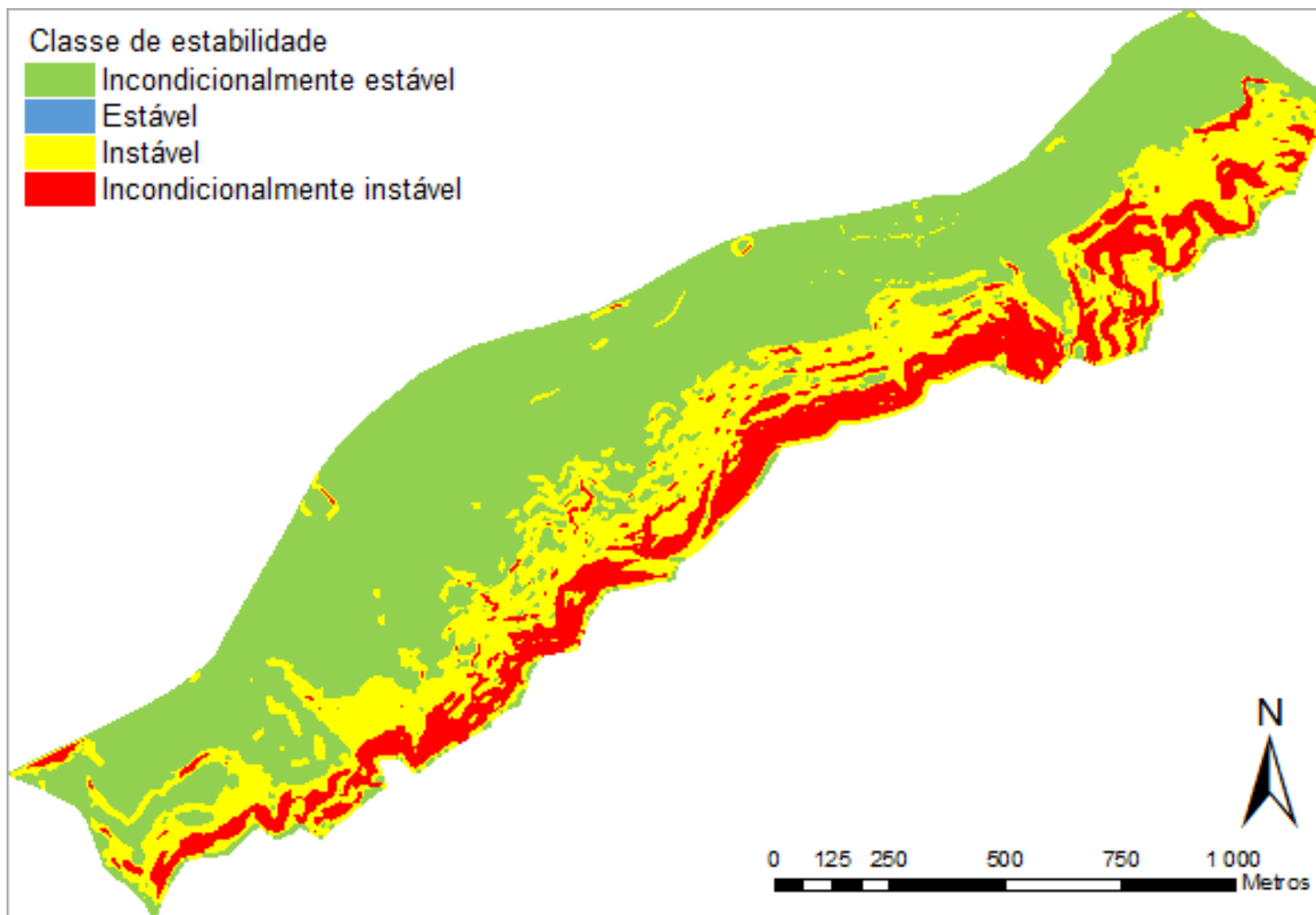


Figura 5.14 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 17

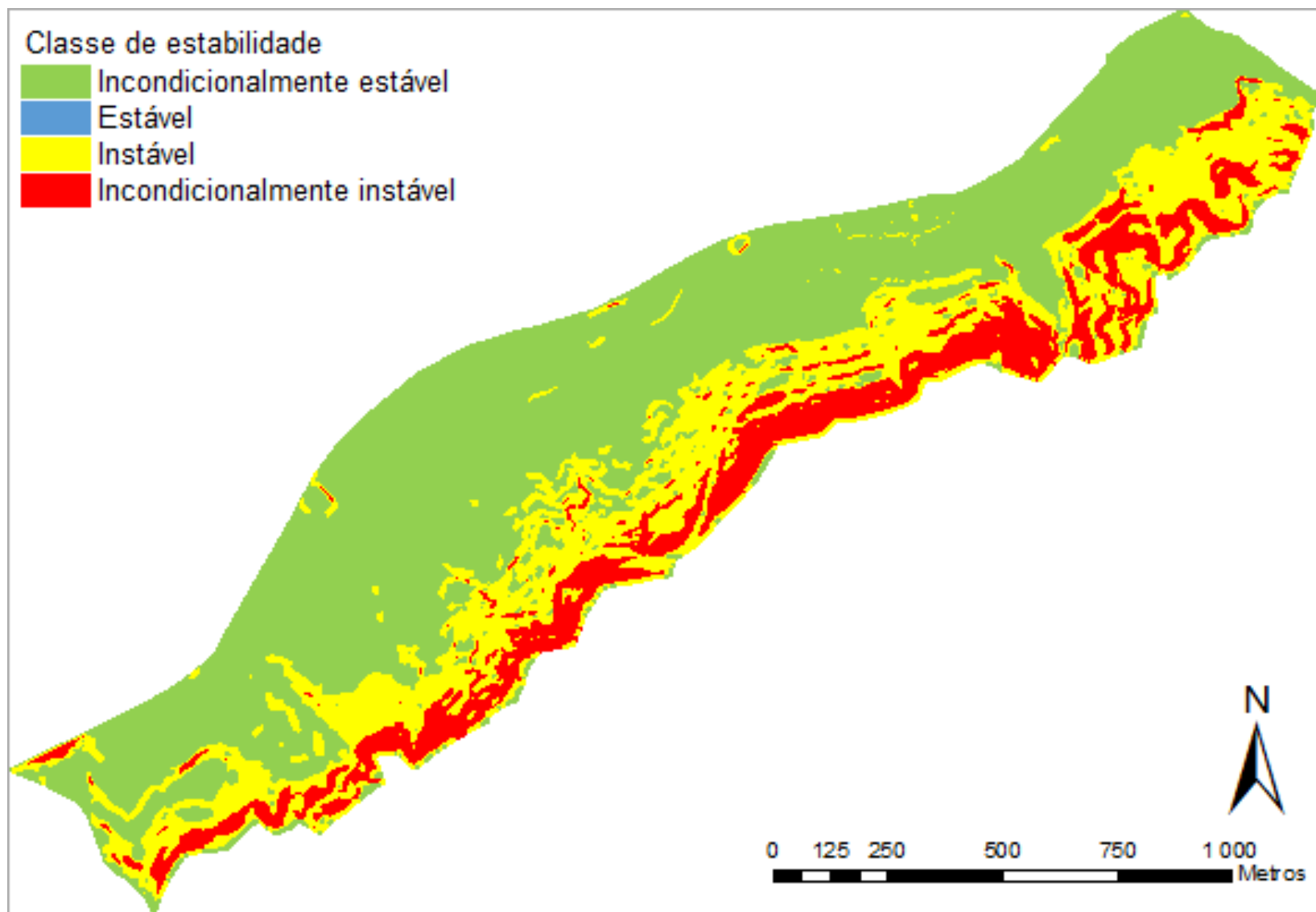


Figura 5.15 - Mapa da estabilidade da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 17

5.1.2 Modelação determinística com componente estocástica

Na modelação determinística com componente estocástica são apresentados mapas executados com uma metodologia modificada do programa SINMAP, adiante designada de metodologia SINMAP. A componente estocástica centra-se nos parâmetros da transmissividade e no ângulo de atrito interno do solo. Para o peso volúmico húmido do solo é escolhido um valor médio, neste caso de 20 kN.m^{-3} , que corresponde ao valor médio dos dados obtidos pela Tecnasol (2002 apud Sousa, 2013).

Nesta modelação são contemplados quatro cenários, apresentados na Tabela 5.8. As diferentes gamas de valores para o ângulo de atrito também são retiradas de Tecnasol (2002 apud Sousa, 2013) e de Sousa (2013). O valor da transmissividade foi variado em 20% e 40%, obtendo-se assim as gamas de valores 20 a $30 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$ e 15 a $35 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$, respectivamente. Os parâmetros de transmissividade e ângulo de atrito foram variados de acordo com uma distribuição de probabilidade uniforme, como sugerido em Gorsevski et al. (2006).

Tabela 5.8 – Gama de valores de transmissividade e ângulo de atrito interno analisados para os cenários 18 a 21

Cenário	Gama de valores de T ($\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$)	Gama de valores de φ (°)
18	[20-30]	[28-32]
19	[15-35]	[28-32]
20	[20-30]	[22,0-33,7]
21	[15-35]	[22,0-33,7]

Numa primeira fase é apresentada a avaliação da estabilidade SI para os quatro cenários (cenários 18 a 21), em função dos valores de recarga efectiva apresentados em 4.2. De seguida, é analisado o valor da recarga efectiva crítica para cada cenário considerado.

5.1.2.1 Avaliação da estabilidade SI em função da recarga efectiva

Numa primeira fase é apresentada, para cada cenário, a avaliação da estabilidade SI em função dos valores de recarga efectiva definidos em 4.2.3. Tal como acontece na modelação determinística absoluta, os valores dos mapas referentes a recargas efectivas de $150 \text{ mm}.\text{dia}^{-1}$ e $200 \text{ mm}.\text{dia}^{-1}$, em qualquer cenário, são iguais aos mapas de recarga efectiva de $100 \text{ mm}.\text{dia}^{-1}$, pelo que apenas será apresentado este último. A avaliação da estabilidade é calculada a partir das equações 4.18 a 4.25. A classificação prevista para a instabilidade e a possível influência de factores não modelados, para cada classe de estabilidade SI, são os apresentados na Tabela 4.3.

a) Cenário 18 - $\gamma_h = 20 \text{ kN.m}^{-3}$; $\varphi = [28-32]^\circ$; $T = [20-30] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$

As Figuras 5.16 a 5.19 apresentam os mapas da estabilidade SI, em função de diferentes valores de recarga efectiva, para a área de estudo num cenário com parâmetros de peso volúmico médio e valores de ângulo de atrito e transmissividade a variar entre 28° e 32° , e 20 e $30 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

A Tabela 5.9 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade SI em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 18, a área incondicionalmente estável oscila entre 87,6% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 69,2% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada. Por seu lado, a área incondicionalmente instável varia entre 11,3% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 24,1% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada.

Para este cenário, as áreas que não são tidas como extremas, apresentam uma estabilidade SI a variar entre 0,5 e 1,25, ou seja, estas áreas são metaestáveis ou estão no limiar inferior de instabilidade. Para que não se verifiquem áreas de estabilidade moderada ou no limiar superior de instabilidade, é possível que estas, com estabilidade SI entre 1,25 e 1,5, e entre 0 e 0,5, tenham sido absorvidas pelas classes incondicionalmente estável e instável, respectivamente.

Tabela 5.9 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 18 em função da recarga efectiva

	$q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$	
	m^2	%	m^2	%	m^2	%	m^2	%
Incondicionalmente estável	1 359 975	87,6	1 123 325	72,3	1 079 050	69,5	1 074 375	69,2
$1,25 < SI < 1,5$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
$1 < SI < 1,25$	9 000	0,6	40 025	2,6	51 375	3,3	53 100	3,4
$0,5 < SI < 1$	8 150	0,5	38 300	2,5	50 250	3,2	51 925	3,3
$0 < SI < 0,5$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente instável	175 675	11,3	351 150	22,6	372 125	24,0	373 400	24,1

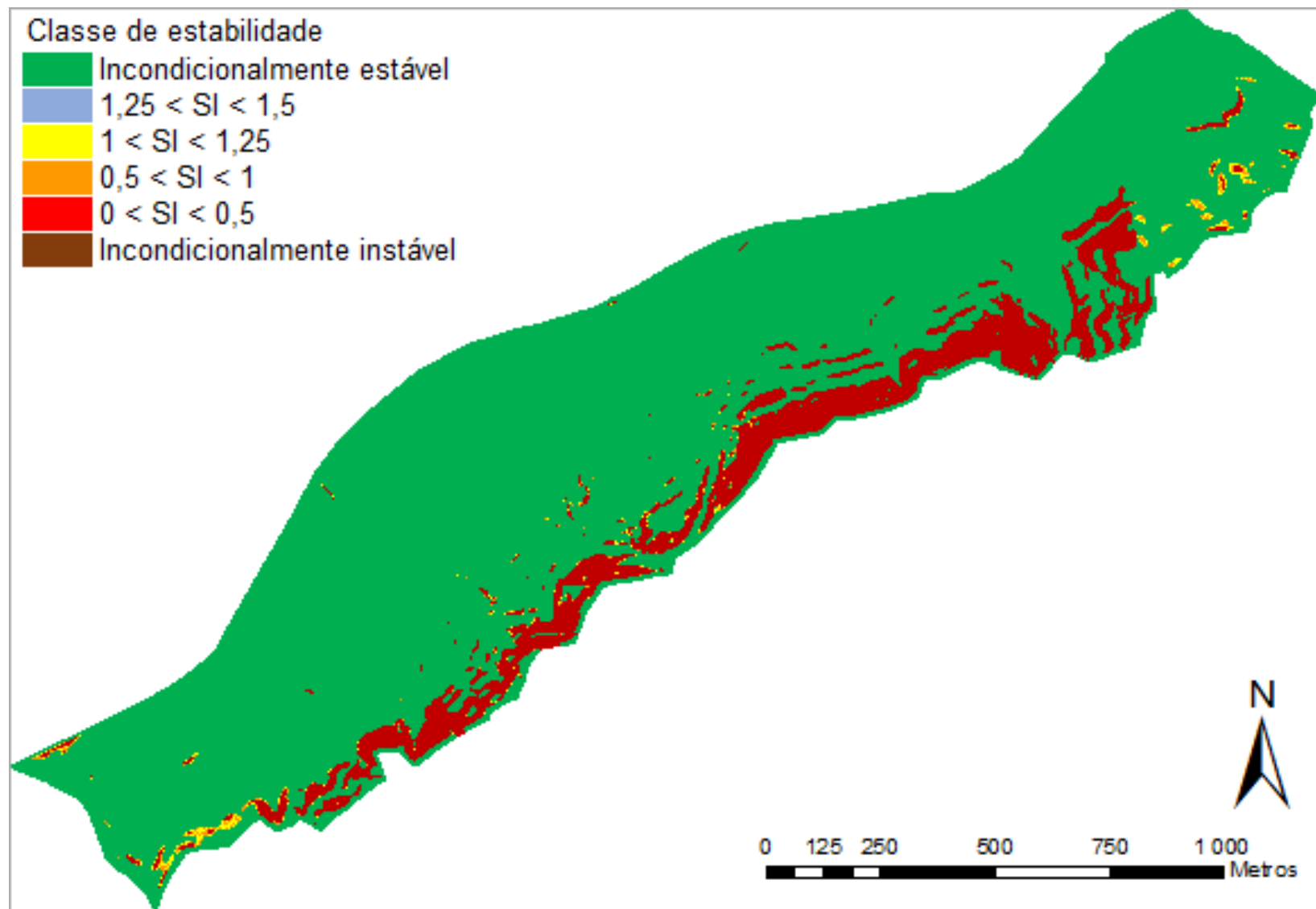


Figura 5.16 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.

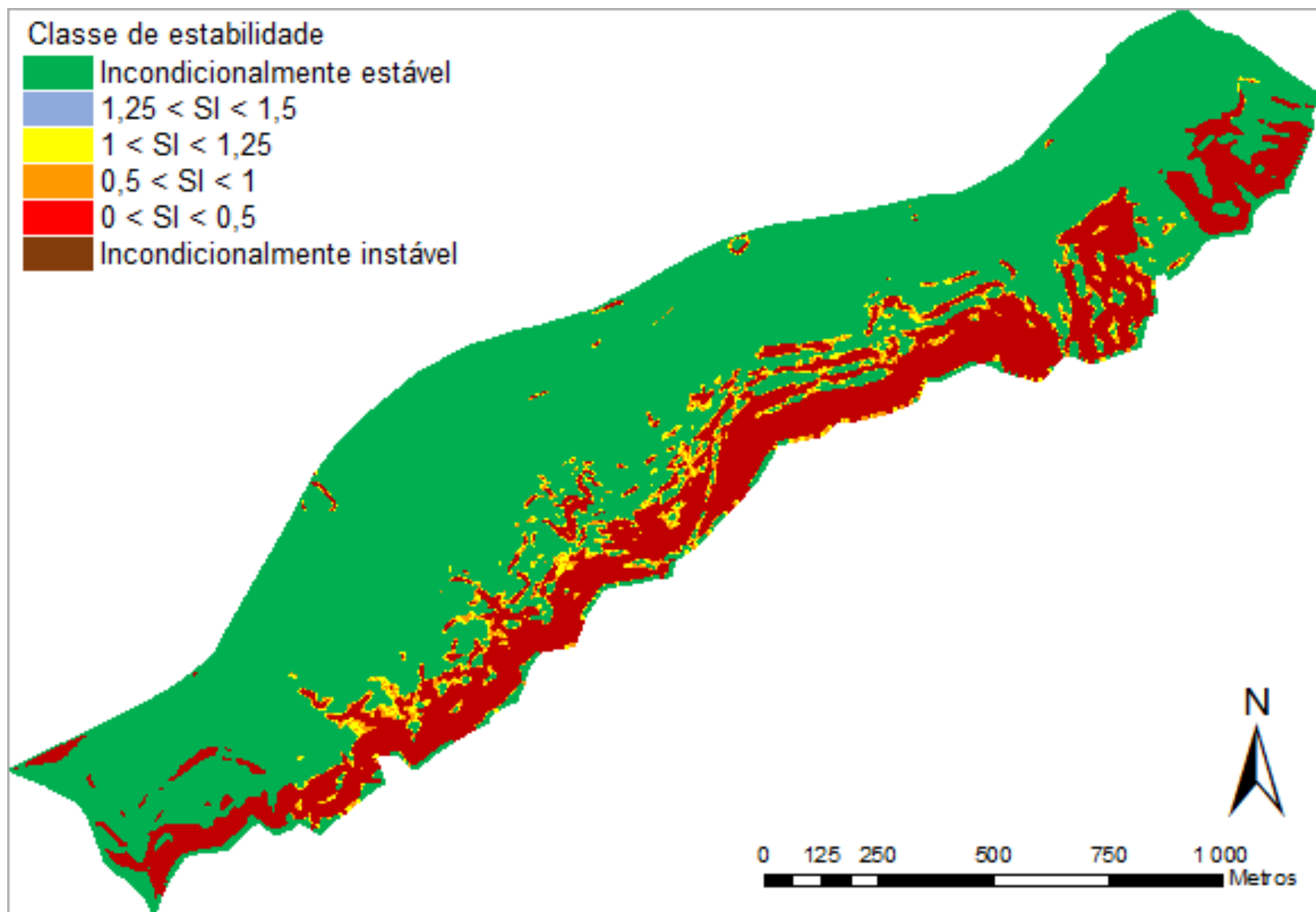


Figura 5.17 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.

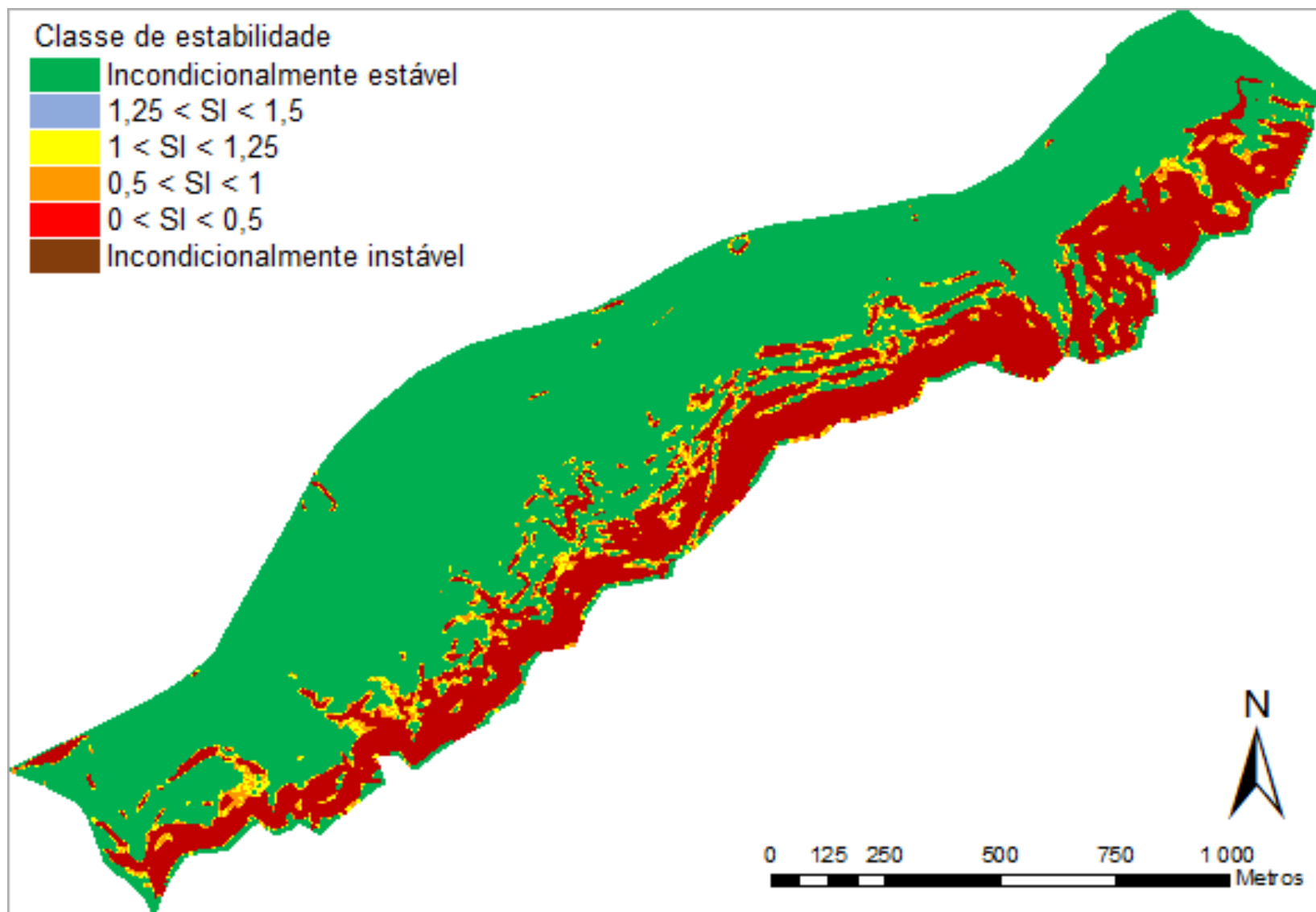


Figura 5.18 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 18.

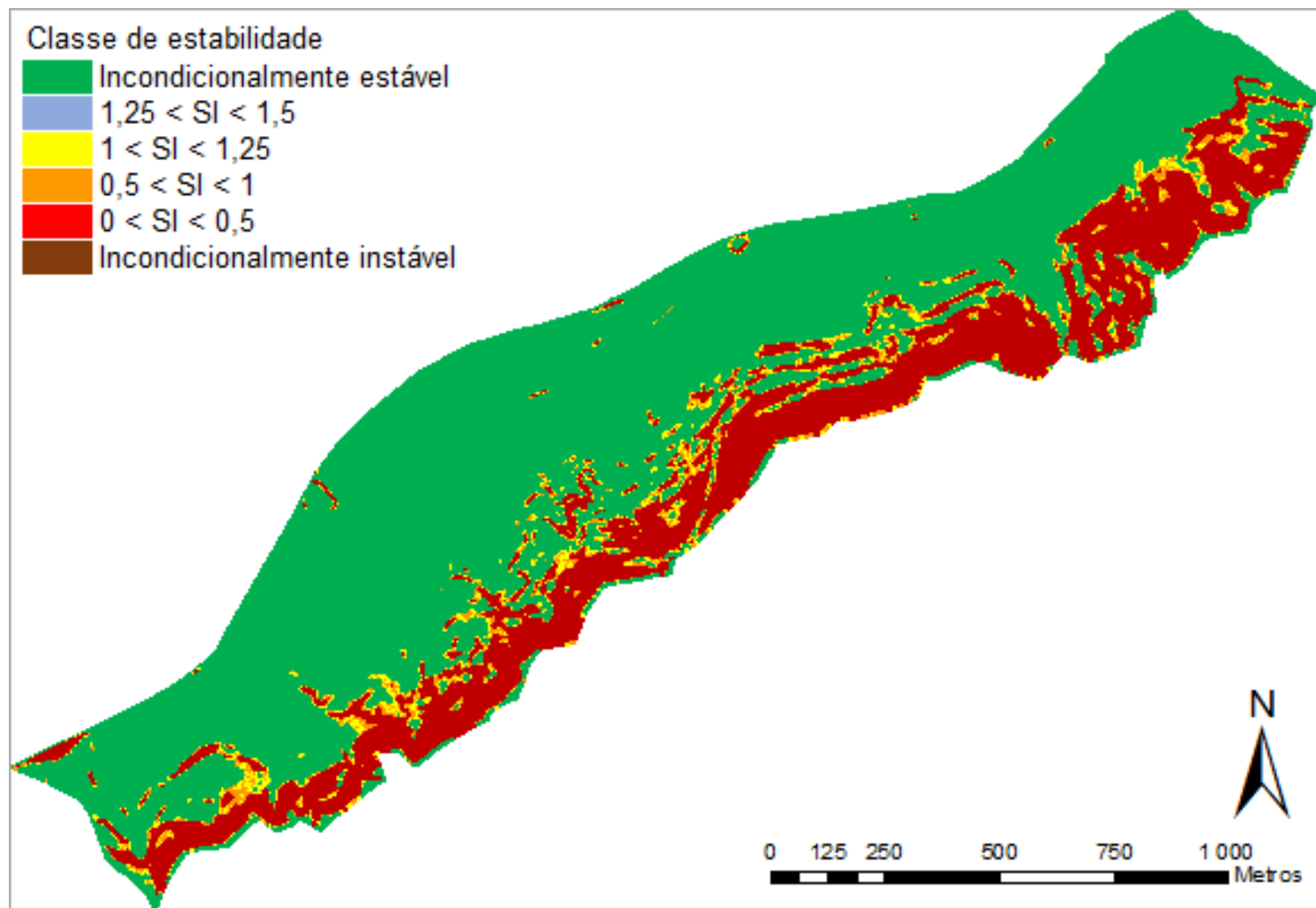


Figura 5.19 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 18.

b) Cenário 19 - $\gamma_h = 20 \text{ kN.m}^{-3}$; $\varphi = [28-32]^\circ$; $T = [15-35] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$

As Figuras 5.20 a 5.23 apresentam os mapas da estabilidade SI, em função de diferentes valores de recarga efectiva, para a área de estudo num cenário com parâmetros de peso volúmico médio e valores de ângulo de atrito e transmissividade a variar entre 28° e 32° , e 15 e $35 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

A Tabela 5.10 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade SI em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 19, a área incondicionalmente estável oscila entre 80,9% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 69,2% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada. Por seu lado, a área incondicionalmente instável varia entre 19,0% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 24,1% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada.

À semelhança do cenário anterior, é possível que as áreas de estabilidade moderada e de limiar superior de instabilidade tenham sido absorvidas pelas áreas extremas adjacentes.

Tabela 5.10 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 19 em função da recarga efectiva.

	$q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$	
	m^2	%	m^2	%	m^2	%	m^2	%
Incondicionalmente estável	1 255 925	80,9	1 123 775	72,4	1 079 050	69,5	1 074 375	69,2
$1,25 < SI < 1,5$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
$1 < SI < 1,25$	725	0,1	39 225	2,5	50 975	3,3	53 100	3,4
$0,5 < SI < 1$	675	0,0	37 175	2,4	49 375	3,2	51 925	3,3
$0 < SI < 0,5$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente instável	295 475	19,0	352 625	22,7	373 400	24,0	373 400	24,1

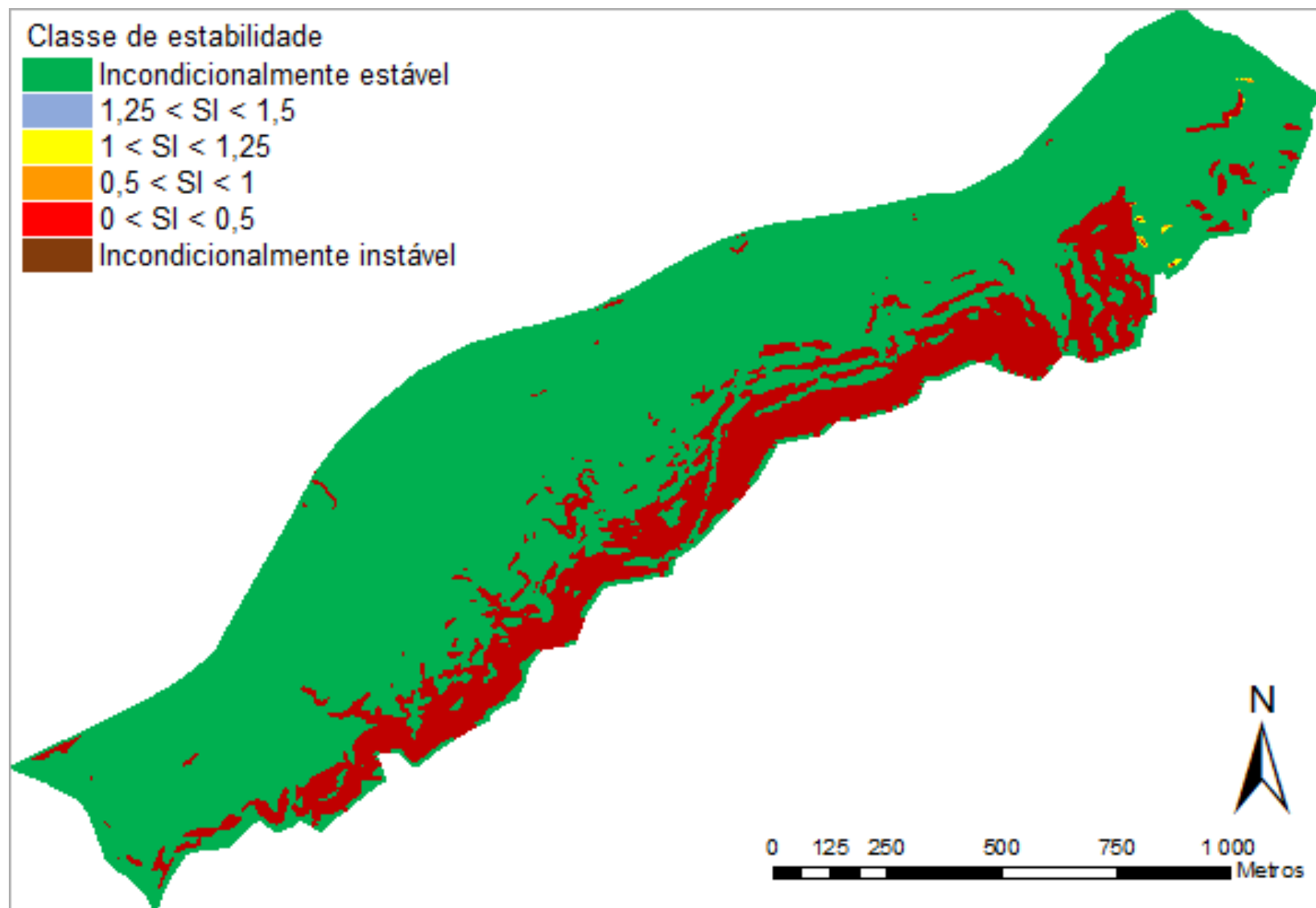


Figura 5.20 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 19.

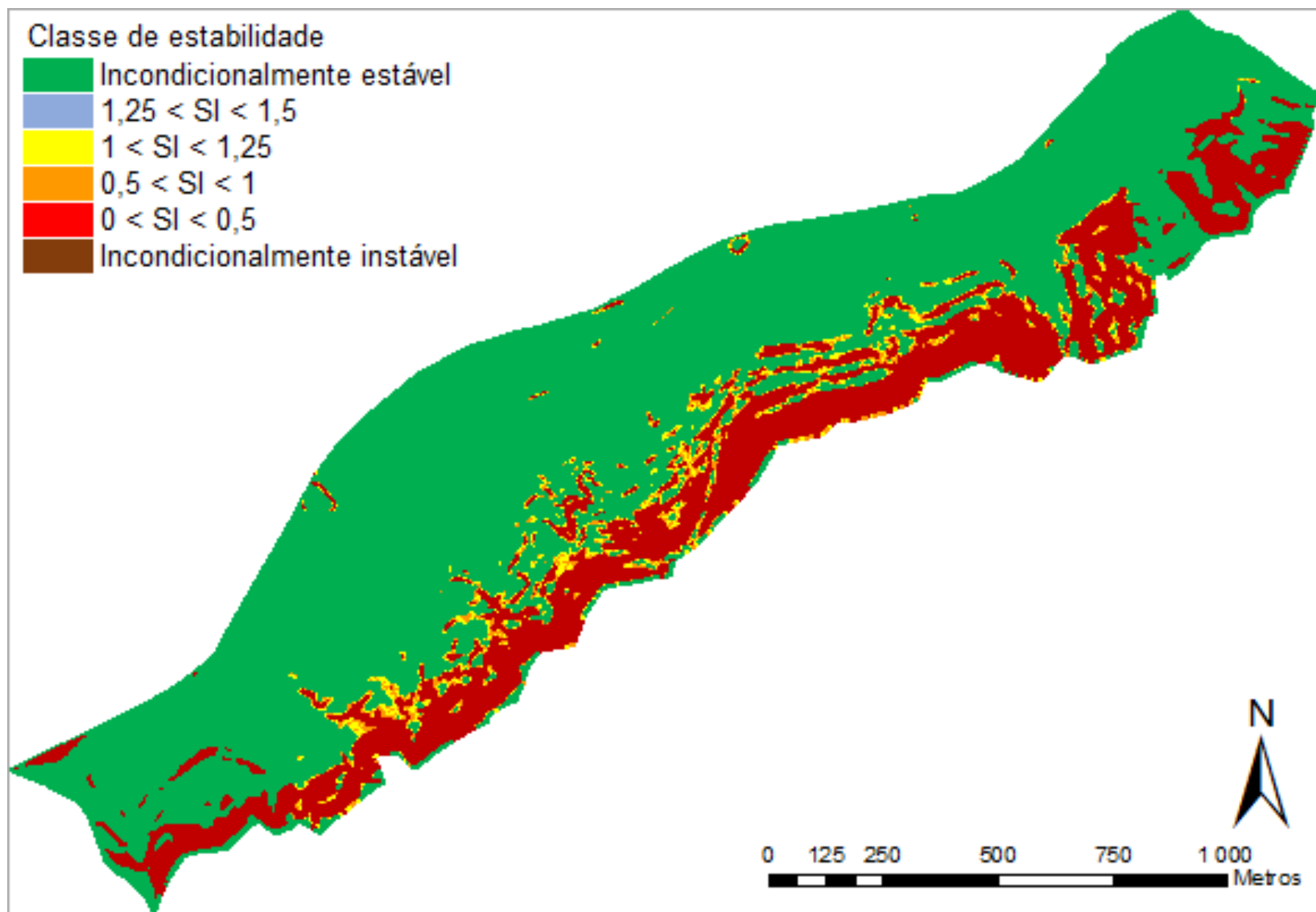


Figura 5.21 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 19.

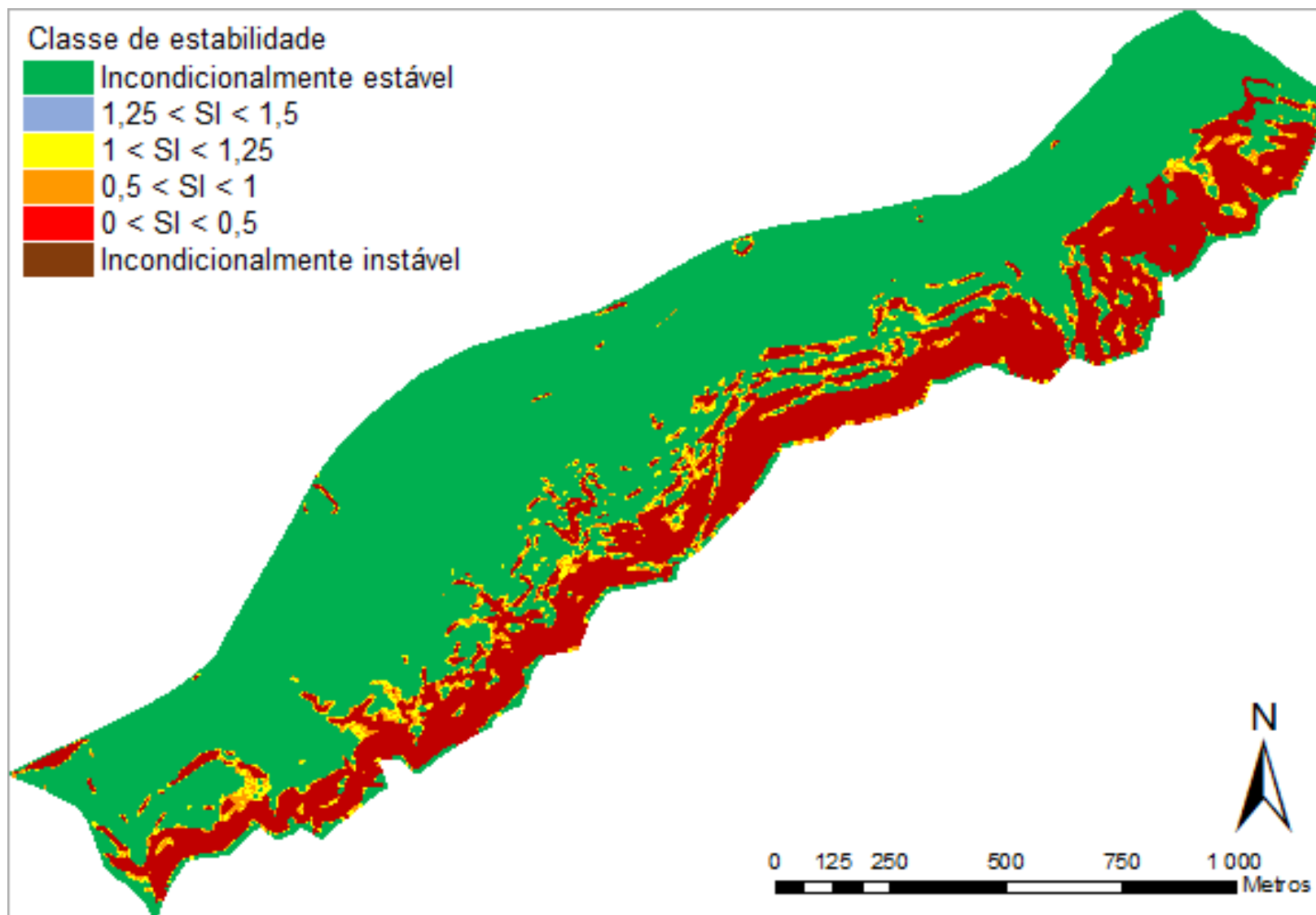


Figura 5.22 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 19.

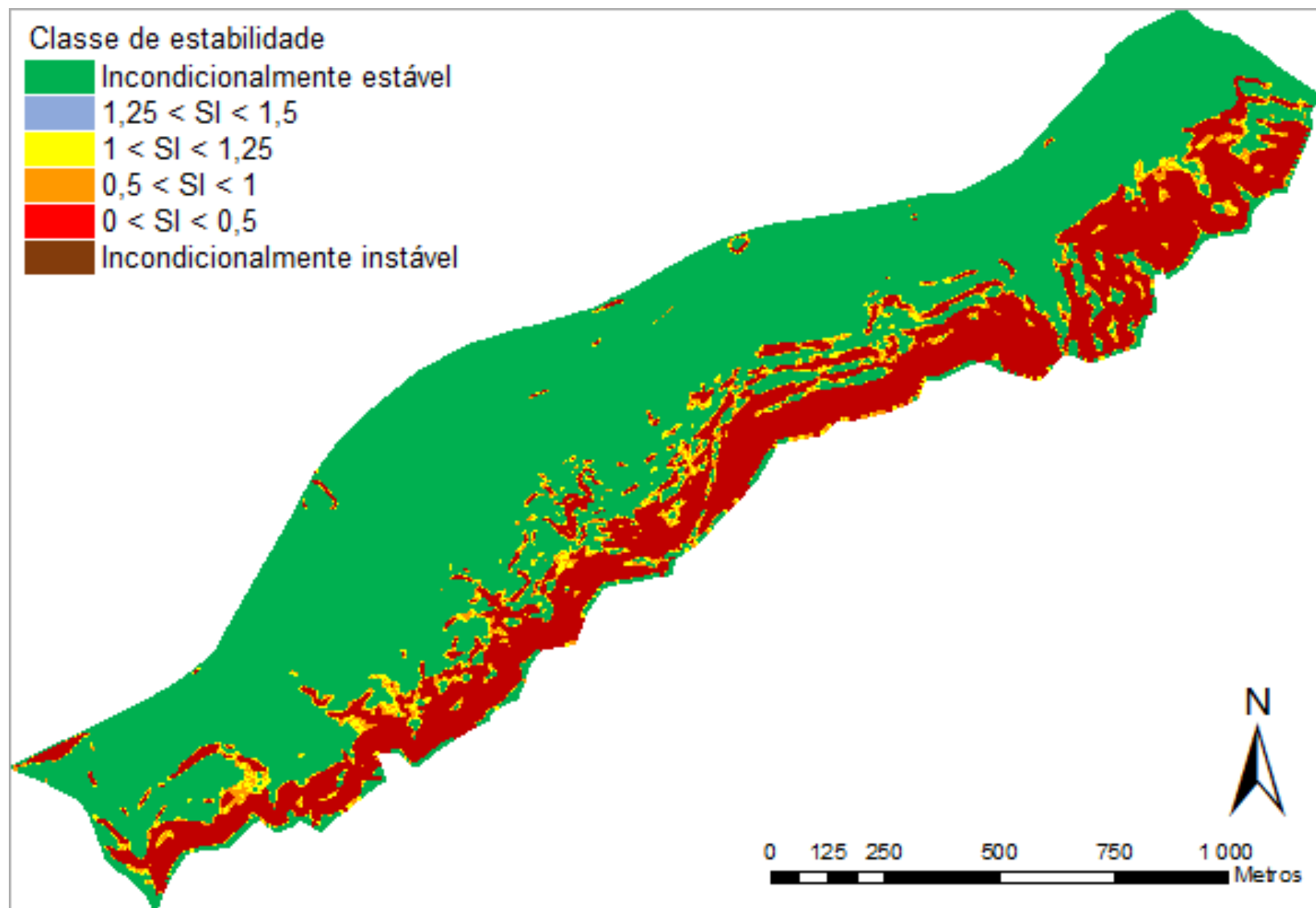


Figura 5.23 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 19.

c) Cenário 20 - $\gamma_h = 20 \text{ kN.m}^{-3}$; $\varphi = [22,0-33,7]^\circ$; $T = [20-30] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$

As Figuras 5.24 a 5.27 apresentam os mapas da estabilidade SI, em função de diferentes valores de recarga efectiva, para a área de estudo num cenário com parâmetros de peso volúmico médio e valores de ângulo de atrito e transmissividade a variar entre $22,0^\circ$ e $33,7^\circ$, e 20 e $30 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

A Tabela 5.11 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade SI em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 20, a área incondicionalmente estável oscila entre 72,6% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 59,7% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada. Por seu lado, a área incondicionalmente instável varia entre 8,3% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 21,2% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada.

Ao contrário dos dois cenários anteriores, existem áreas classificadas como tendo estabilidade moderada. Tal é possível de dever-se ao facto de este cenário apresentar uma gama de valores de ângulo de atrito mais abrangente que possibilite que a totalidade desta classe não seja absorvida pela classe de estabilidade incondicional.

Tabela 5.11 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 20 em função da recarga efectiva.

	$q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$	
	m^2	%	m^2	%	m^2	%	m^2	%
Incondicionalmente estável	1 127 425	72,6	941 600	60,7	929 100	59,8	926 550	59,7
$1,25 < SI < 1,5$	38 950	2,5	40 600	2,6	35 700	2,3	35 900	2,3
$1 < SI < 1,25$	114 400	7,4	105 700	6,8	97 800	6,3	98 000	6,3
$0,5 < SI < 1$	143 550	9,2	155 350	10,0	161 625	10,4	162 600	10,5
$0 < SI < 0,5$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente instável	128 475	8,3	309 550	19,9	328 575	21,2	329 750	21,2

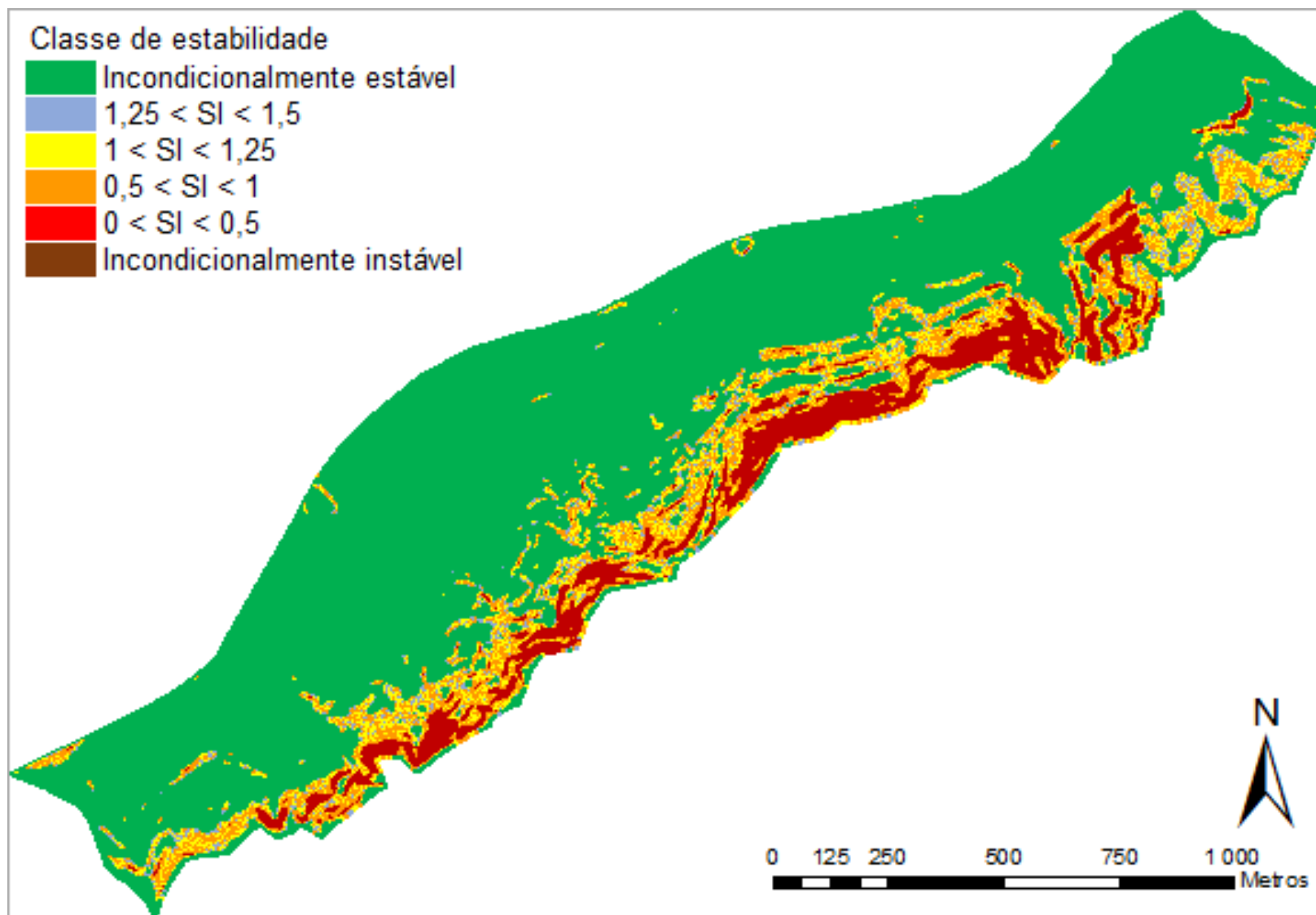


Figura 5.24 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 20.

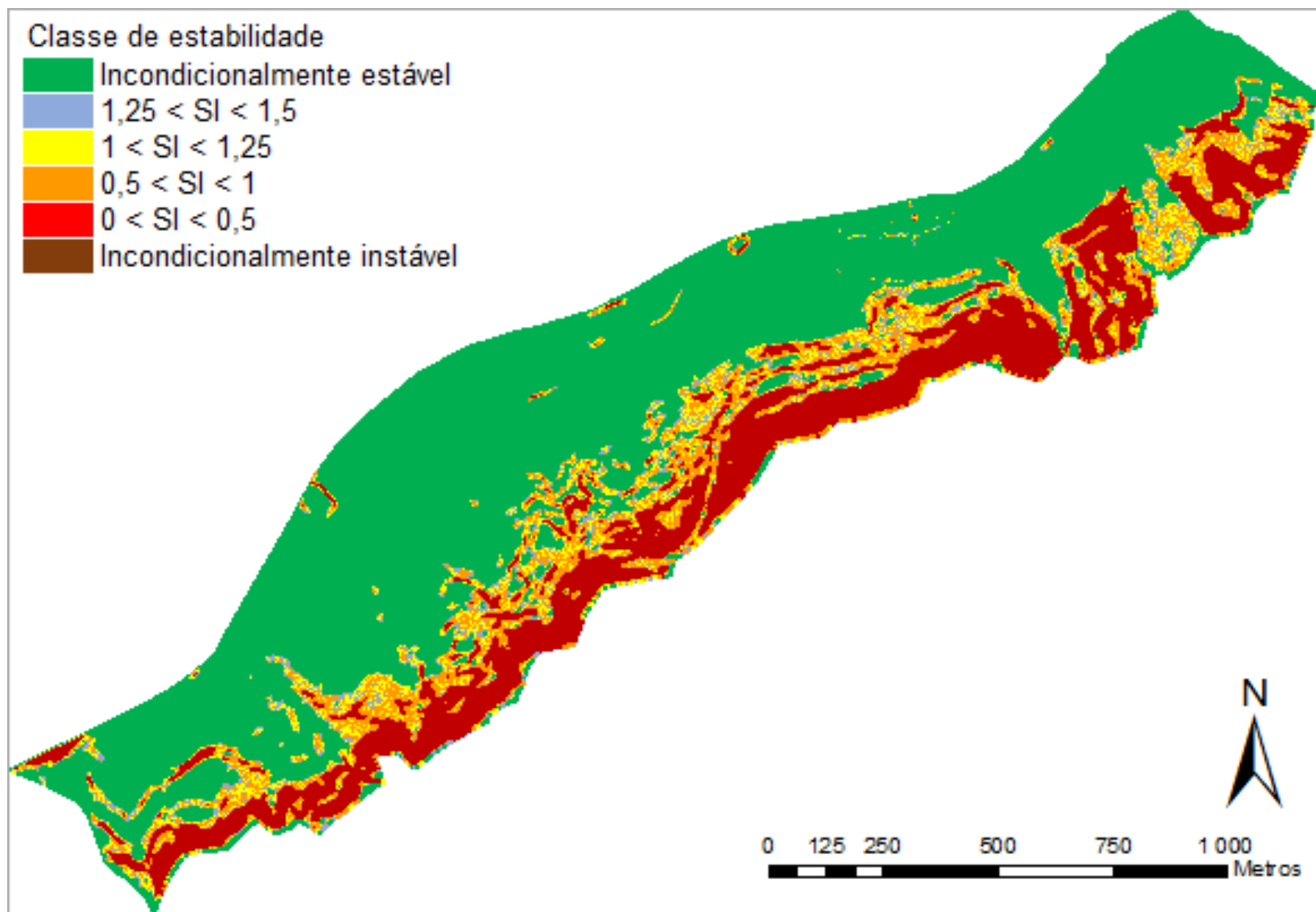


Figura 5.25 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 20.

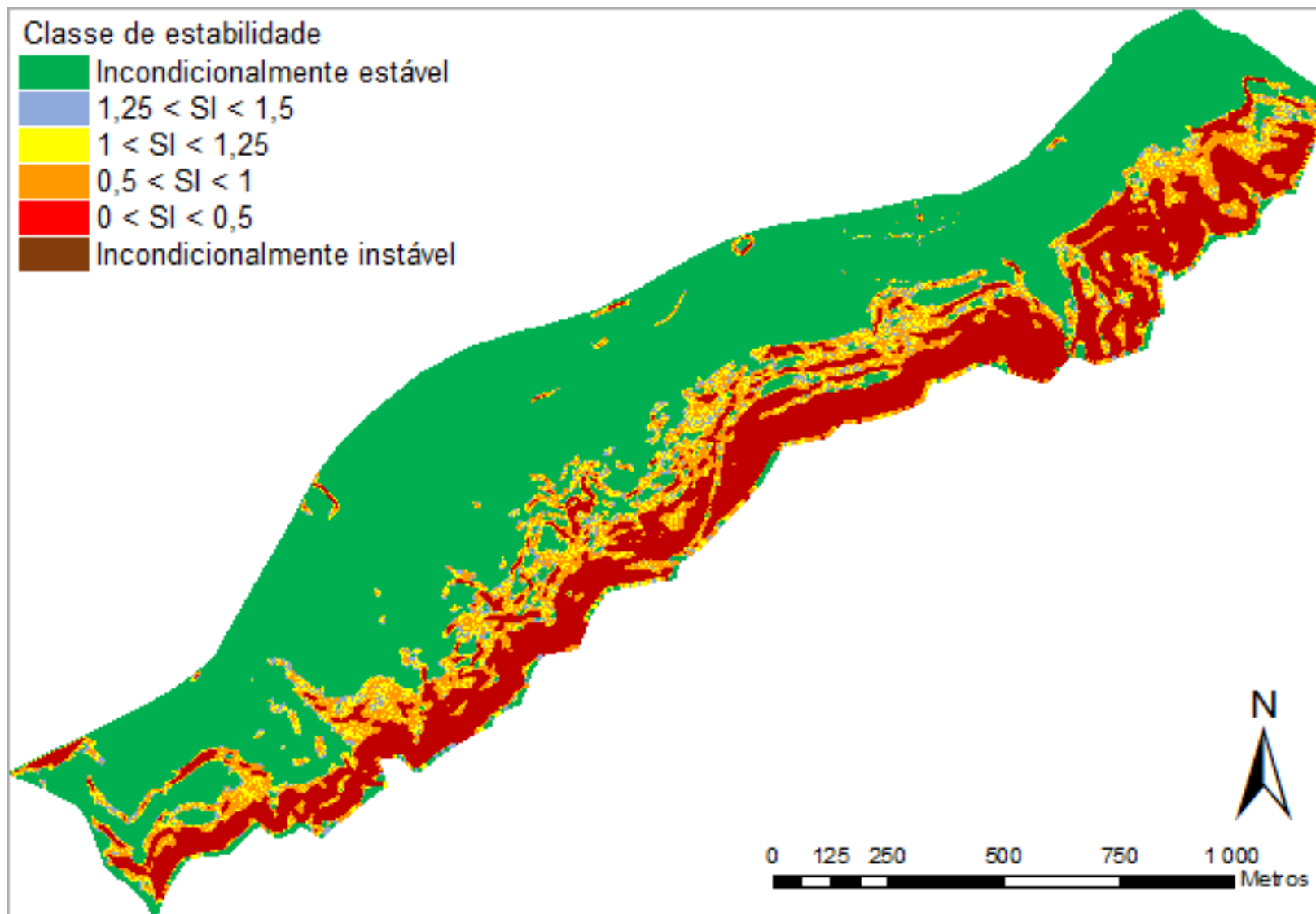


Figura 5.26 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 20.

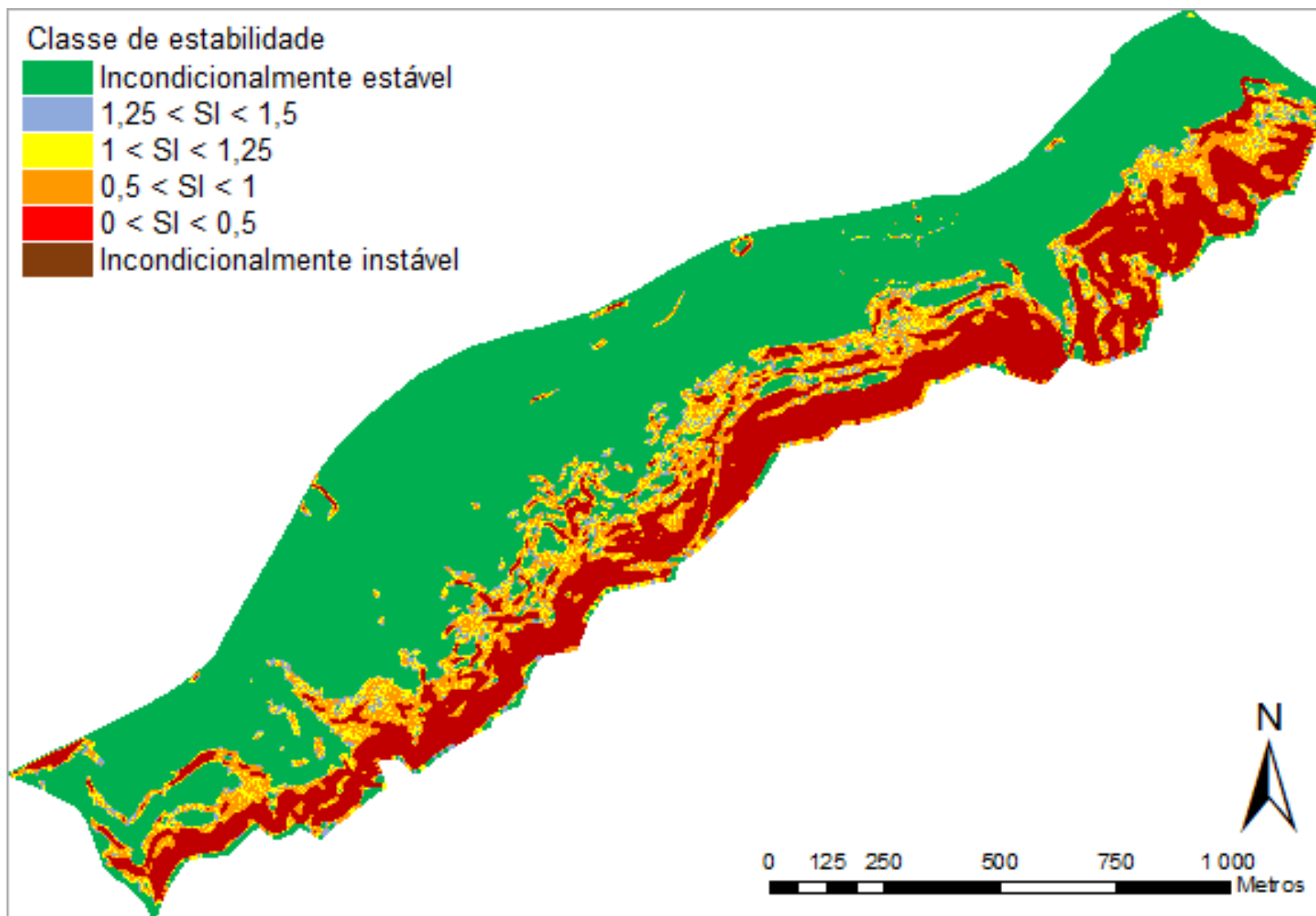


Figura 5.27 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 20.

d) Cenário 21 - $\gamma_h = 20 \text{ kN.m}^{-3}$; $\varphi = [22,0-33,7]^\circ$; $T = [15-35] \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$

As Figuras 5.28 a 5.31 apresentam os mapas da estabilidade SI, em função de diferentes valores de recarga efectiva, para a área de estudo num cenário com parâmetros de peso volúmico médio e valores de ângulo de atrito e transmissividade a variar entre $22,0^\circ$ e $33,7^\circ$, e 15 e $35 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

A Tabela 5.12 sumariza os dados referentes aos mapas da estabilidade SI em função de todos os valores de recarga efectiva considerados.

No cenário 21, a área incondicionalmente estável oscila entre 75,9% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 59,7% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada. Por seu lado, a área incondicionalmente instável varia entre 16,5% (para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$) e 21,2% (para $q \geq 100 \text{ mm.dia}^{-1}$) da área estudada.

À semelhança do cenário anterior, também se apresentam áreas com estabilidade moderada.

Tabela 5.12 – Valores obtidos para os mapas de estabilidade no cenário 21 em função da recarga efectiva.

	$q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$		$q = 100, 150 \text{ e } 200 \text{ mm.dia}^{-1}$	
	m^2	%	m^2	%	m^2	%	m^2	%
Incondicionalmente estável	1 179 200	75,9	960 375	61,8	929 975	59,9	926 550	59,7
$1,25 < SI < 1,5$	20 625	1,3	33 900	2,2	35 525	2,3	35 900	2,3
$1 < SI < 1,25$	50 425	3,2	97 775	6,3	96 875	6,2	98 000	6,3
$0,5 < SI < 1$	46 775	3,0	150 425	9,7	160 675	10,3	162 600	10,5
$0 < SI < 0,5$	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente instável	255 775	16,5	310 325	20,0	329 750	21,2	329 750	21,2

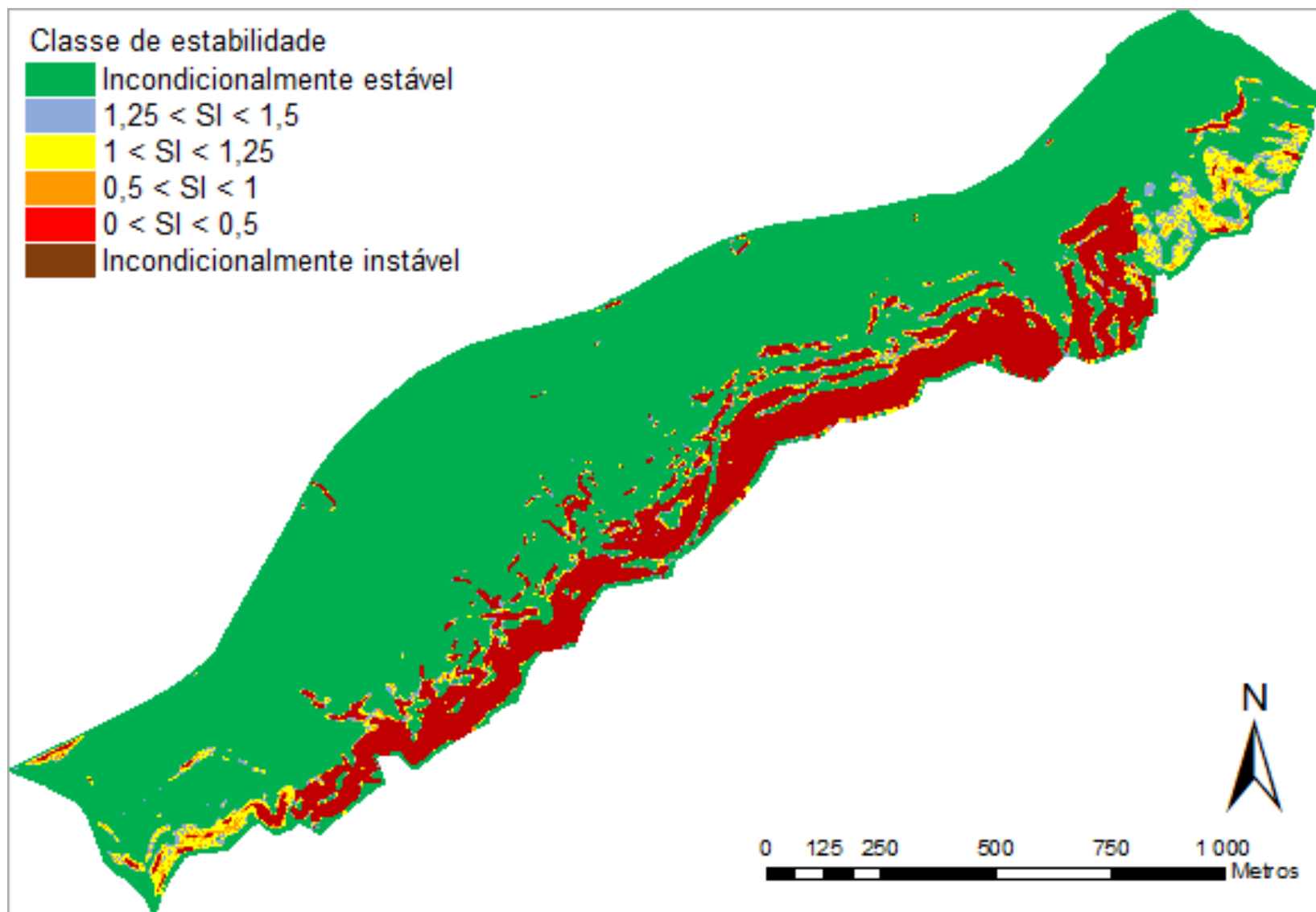


Figura 5.28 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 10 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 21.

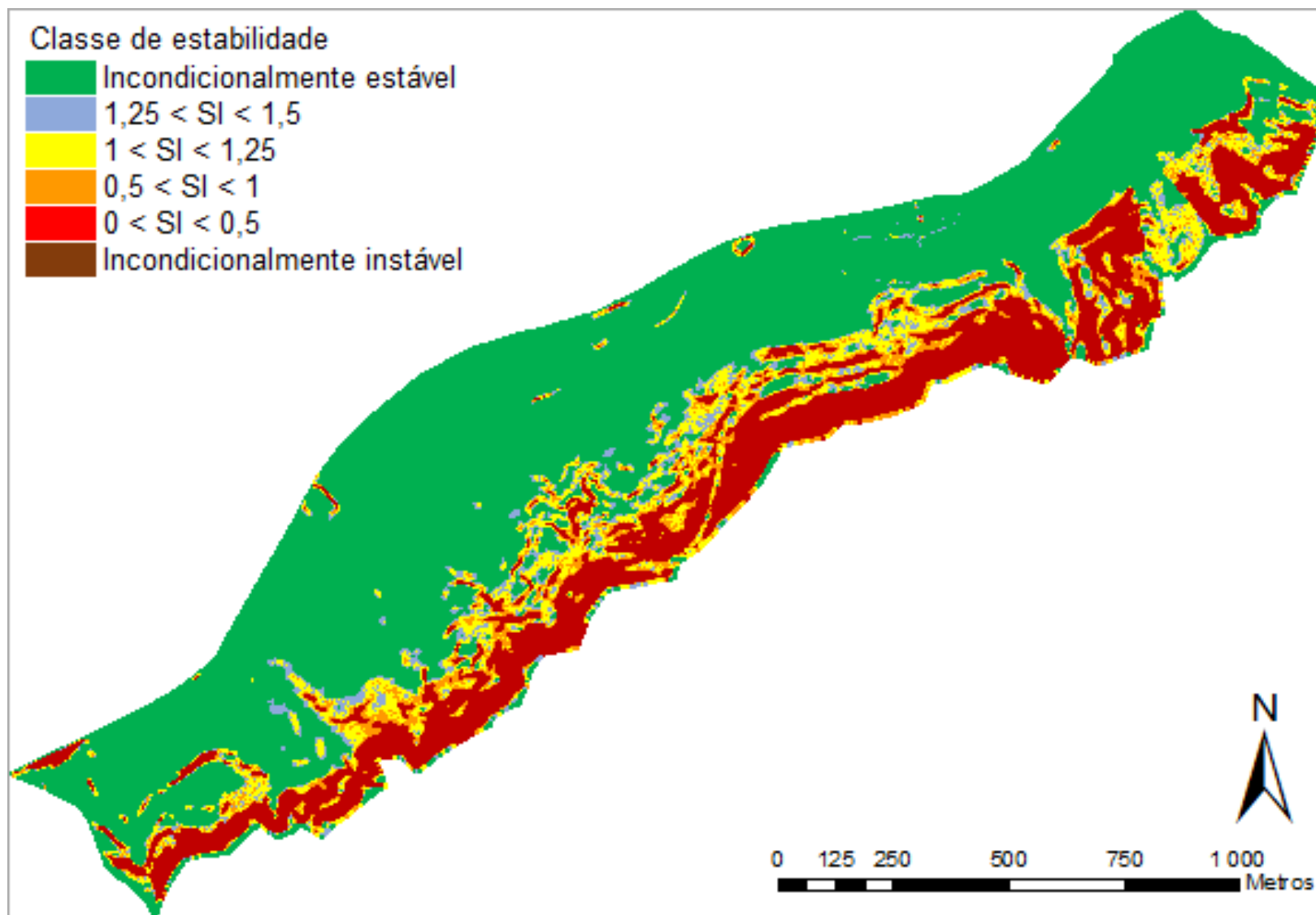


Figura 5.29 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 20 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 21.

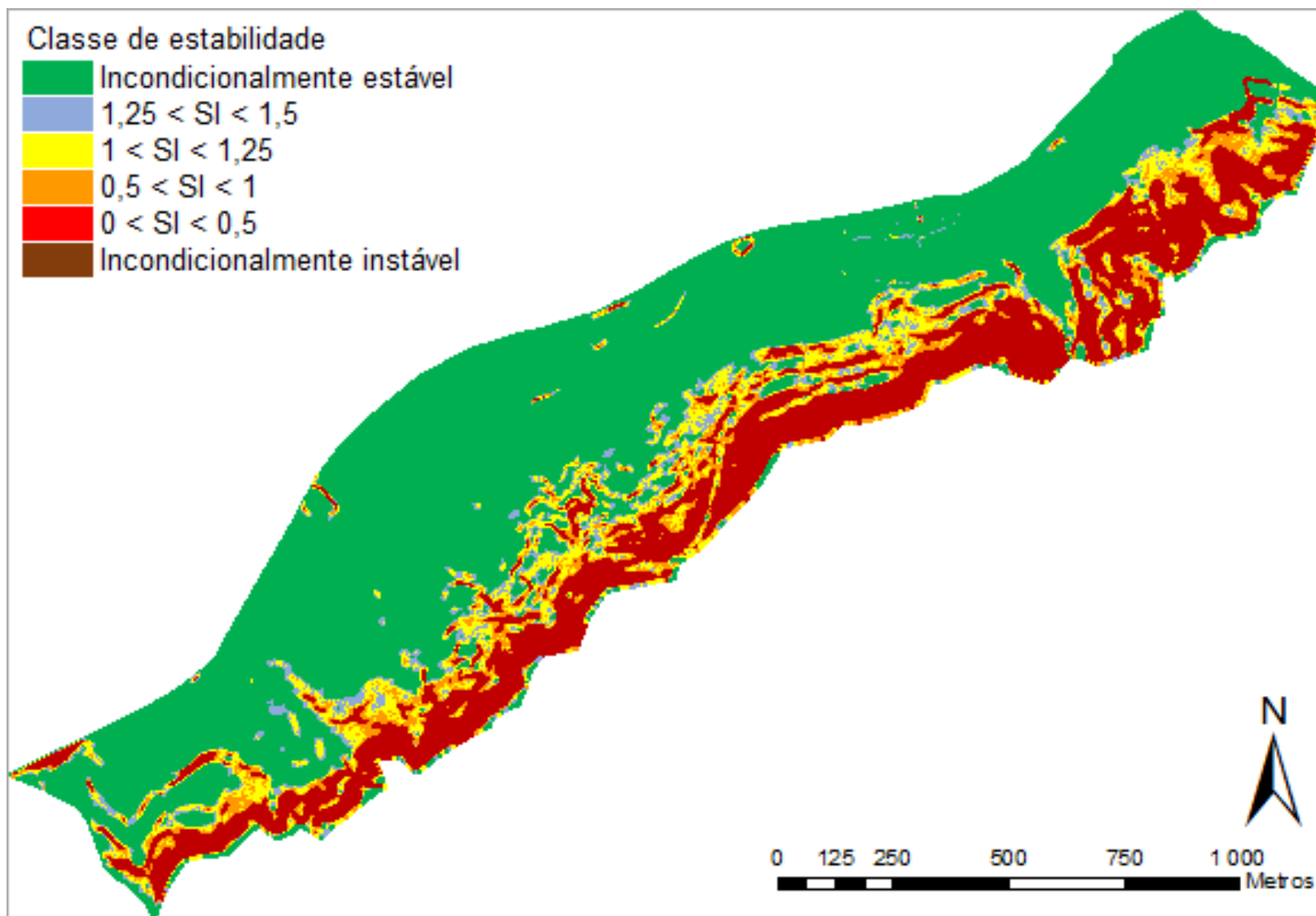


Figura 5.30 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 50 \text{ mm.dia}^{-1}$, no cenário 21.

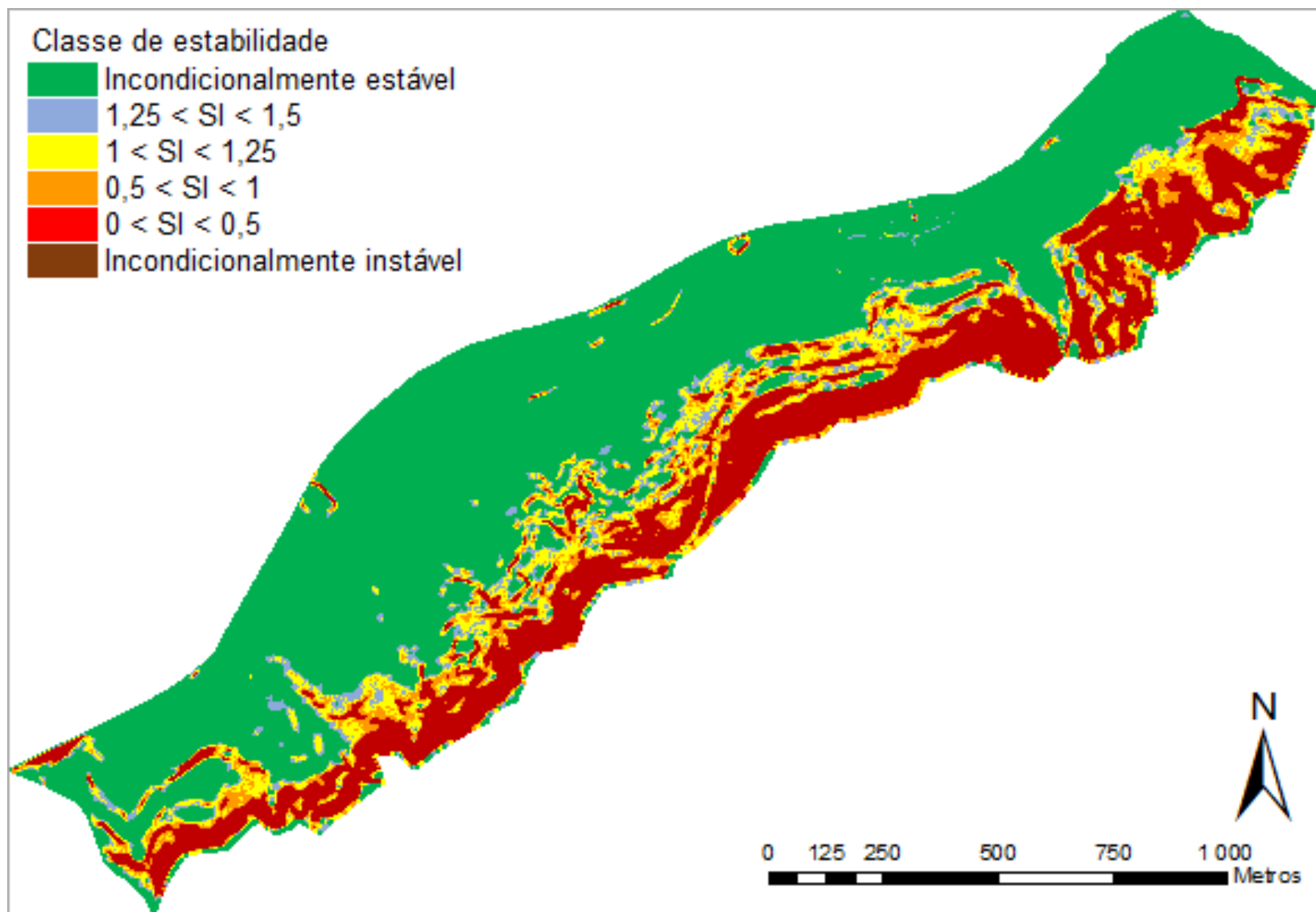


Figura 5.31 - Mapa da estabilidade, em função de SI, da área de estudo para $q = 100, 150$ e 200 mm.dia^{-1} , no cenário 21.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E PLANEAMENTO URBANO

Neste subcapítulo é efectuada uma análise de sensibilidade dos parâmetros geotécnicos e dos parâmetros hidrológicos/hidrogeológicos, comparando as recargas efectivas críticas obtidas para cada cenário considerado. Os parâmetros geotécnicos são analisados independentemente dos hidrológicos/hidrogeológicos, uma vez que existe a possibilidade de o fazer devido às características das classes extremas. Como referido anteriormente, estas classes, designadas por incondicionais (i.e. incondicionalmente estável e incondicionalmente instável), apenas dependem dos factores geotécnicos, ou seja, do declive (θ), do ângulo de atrito interno (φ) e do peso volúmico húmido do solo (γ_h). As restantes classes, já têm em conta alguns parâmetros hidrológicos/hidrogeológicos tais como a área de contribuição específica (A ou a/b), a transmissividade do solo (T) e a recarga efectiva (q).

De seguida é realizada uma comparação entre os resultados de estabilidade obtidos com $\log(q/T)$ e SI recorrendo a uma metodologia de comparação proposta por Michel et al. (2012).

Depois é apresentada uma avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno, com recurso aos valores de recarga efectiva crítica, para os bairros Quinta das Arrombas, Serra da Luz, Quinta do José Luís, Encosta da Luz e Vale do Forno, da Vertente Sul de Odivelas.

Por fim são apresentadas algumas considerações sobre os resultados obtidos em relação às recomendações da Reserva Ecológica Nacional (REN) e às do zonamento à aptidão da construção do Plano Director Municipal de Odivelas. Também são discutidos os valores de precipitação diária máximos observados na região em estudo para contextualizar os resultados obtidos nas diversas análises da recarga efectiva crítica.

5.2.1 Comparação entre as recargas efectivas críticas de cada metodologia

A análise de sensibilidade efectuada contempla os resultados dos mapas de recarga efectiva crítica (Tabelas 5.5 a 5.7 e 5.9 a 5.12) 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.

Os dados referentes aos cenários 2 a 15 podem ser encontrados no Anexo III.

As classes extremas seguem as equações da modelação determinística absoluta da Tabela 4.1 e as restantes classes regem-se pela Equação 4.15 da determinação da recarga efectiva crítica. A diferença para a modelação determinística absoluta é que os parâmetros de transmissividade e ângulo de atrito do solo apresentam uma distribuição uniforme dentro das gamas de valores da Tabela 5.8.

5.2.1.1 Parâmetros geotécnicos

Na avaliação da estabilidade de acordo com a metodologia SHALSTAB, e como salientado, as duas classes extremas são regidas pelos valores do peso volúmico húmido e do ângulo de atrito do solo (Tabela 4.5 e Equações 4.11 e 4.12). Na Tabela 5.13 encontram-se resumidos os valores destes parâmetros para os cenários considerados na análise de sensibilidade.

Tabela 5.13 – Valores de peso volúmico húmido e ângulo de atrito interno para os cenários 1 e 16 a 21.

	Cenário 1	Cenário 16	Cenário 17	Cenário 18	Cenário 19	Cenário 20	Cenário 21
γ_h (kN.m ⁻³)	20	22,7	19,7	20	20	20	20
φ (°)	30	33,7	22,0	[28-32]	[28-32]	[22,0-33,7]	[22,0-33,7]

Nas Tabelas 5.14a e 5.14b e são apresentados os resultados referentes às classes “incondicionalmente estável” e “incondicionalmente instável” para os cenários apresentados anteriormente. Os mesmos resultados são apresentados num histograma na Figura 5.32, para melhor visualização da evolução daquelas duas classes incondicionais em relação aos valores de ângulo de atrito.

Tabela 5.14a – Valores referentes às duas classes extremas, 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	%
Incond. estável	1 127 875	72,6	1 291 675	83,2	915 675	59,0
Incond. instável	44 900	2,9	13 950	0,9	222 850	14,4

Tabela 5.14b – Valores referentes às duas classes extremas, 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	%
Incond. estável	1 127 475	72,6	1 127 475	72,6	1 060 450	68,3	1 060 450	68,3
Incond. instável	47 425	3,1	47 425	3,1	98 500	6,3	98 500	6,3

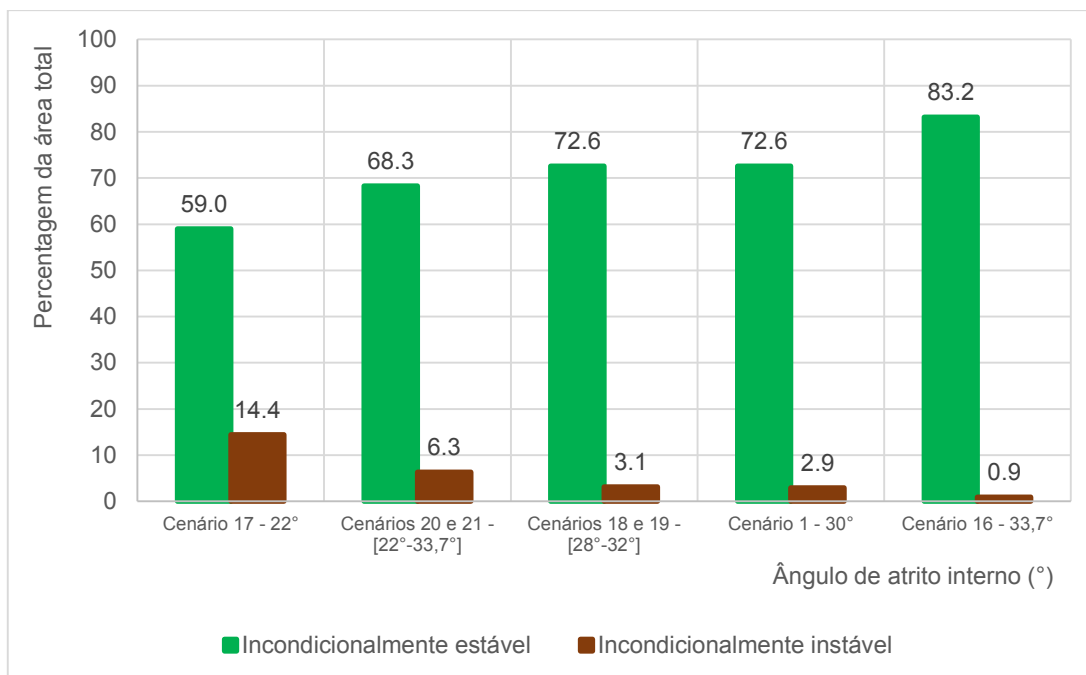


Figura 5.32 – Distribuição da percentagem da área total abrangida pelas classes incondicionais em relação ao valor do ângulo de atrito para os cenários 1 e 16 a 21

Para uma optimização da análise de sensibilidade, foi efectuada uma comparação entre os valores obtidos pelas duas técnicas. A primeira, entre a avaliação determinística absoluta com valor de ângulo de atrito de 30° (cenário 1) e a avaliação determinística com componente estocástica para uma gama de valores de ângulo de atrito em que este tinha sofrido uma variação de cerca de 6,7% (cenários 18 e 19) e cujo valor médio de ângulo de atrito é de 30°. Em seguida, compararam-se os valores referentes à avaliação determinística absoluta para um ângulo de atrito de 27,9°, obtidos por regressão linear a partir dos cenários determinísticos absolutos com peso volúmico do solo de 20 kN.m⁻³ (cenários 1 e 4 a 7) de modo a se poder proceder à comparação com os dados dos cenários 20 e 21, cujo valor médio de ângulo de atrito é 27,9° e com uma gama de valores a variar cerca de 21%.

a) Comparação entre os cenários absoluto 1 e de componente estocástica 18 e 19

Os cenários 18 e 19 apresentam valores de estabilidade e instabilidade incondicional semelhantes aos do cenário 1, com uma diferença de 400 m² na classe incondicionalmente estável e 2525 m² na classe incondicionalmente instável. Ambas as classes dependem do valor da tangente do ângulo de atrito interno, no entanto, a classe incondicionalmente estável também depende do valor, não variável, do peso volúmico húmido do solo (Equação 4.12). Desta forma, é compreensível que a classe incondicionalmente instável apresente uma diferença cerca de 6,25 vezes maior que a incondicionalmente estável. No entanto, a diferença de 2525 m² da classe incondicionalmente instável entre o cenário 1 e os cenários 16 e 17 não é significativa tendo em conta que a área de estudo contém cerca de 158,28 hectares de terreno. Tal valor de diferença é pequeno e dever-se-à ao facto do valor de ângulo de atrito apenas ter sido variado em cerca de 6,7%.

b) Comparação entre os cenários absolutos 1 e 4 a 7 e os de componente estocástica 20 e 21

Seguindo o mesmo raciocínio, procurou-se comparar os valores obtidos com os cenários 20 e 21 (avaliação determinística com componente estocástica) com os dos cenários 1 e 4 a 7 (avaliação determinística absoluta). Esta comparação é possível de ser efectuada pois os três cenários partilham o mesmo valor de peso volúmico húmido do solo (i.e. 20 kN.m^{-3}). A Tabela 5.15 apresenta os resultados obtidos nas classes extremas na avaliação determinística absoluta para um peso volúmico do solo de 20 kN.m^{-3} , ou seja, para os cenários 1 e 4 a 7. Na Figura 5.33 estão representados os valores da Tabela 5.15 e as respectivas equações de regressão linear.

Com as equações da regressão linear para as classes incondicionalmente estável e instável expressas no gráfico da Figura 5.33, pode-se obter um valor hipotético de área para um valor de ângulo de atrito de $27,85^\circ$ (i.e. a média entre 22° e $33,7^\circ$) para cada classe contemplada. Assim, para um valor de ângulo de atrito de $27,85^\circ$, a classe incondicionalmente estável teria 107,06 ha (68,9% da área de estudo) e a classe incondicionalmente instável teria 7,47 ha (4,8% da área de estudo). A diferença de área para os cenários 20 e 21 é de 1,01 ha (0,65 pontos percentuais) para a classe incondicionalmente estável e de 2,38 ha (1,54 pontos percentuais) para a classe incondicionalmente instável. Nesta análise comparativa registaram-se maiores diferenças entre os valores de área, pois os valores de ângulo de atrito foram variados em cerca de 21%.

Tabela 5.15 – Área das classes extremas, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, em função do ângulo de atrito, para um peso volúmico húmido do solo de 20 kN.m^{-3} (cenários 1 e 4 a 7).

Cenários	ϕ (°)	Incond. estável		Incond. instável	
		m ²	%	m ²	%
4	28	1 074 375	69,2	74 975	4,8
5	29	1 100 550	70,9	58 400	3,8
1	30	1 127 875	72,6	44 900	2,9
6	31	1 153 300	74,3	31 925	2,1
7	32	1 179 400	76,0	23 225	1,5

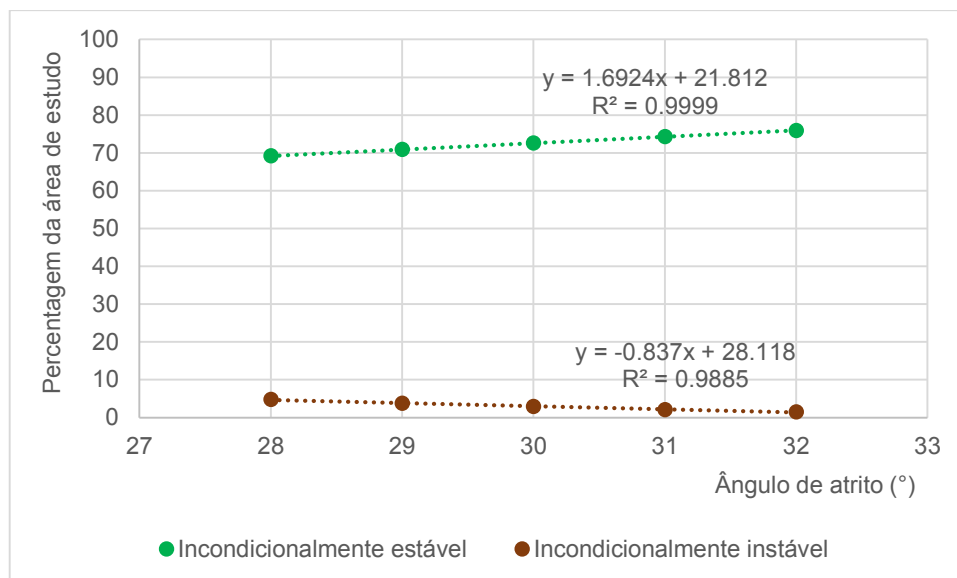


Figura 5.33 – Valores de ângulo de atrito em função da percentagem da área de estudo abrangida pelas classes incondicionalmente estável e instável, para os cenários 1 e 4 a 7, e respectivas linhas de regressão linear.

c) Análise das comparações

As Tabelas 5.16a e 5.16b resumem os valores referentes às duas comparações realizadas entre os cenários da avaliação determinística absoluta (cenários 1 e 4 a 7) e os da avaliação determinística com componente estocástica (cenários 18 a 21). A tabela também apresenta a diferença de área, em hectares e pontos percentuais, entre os dois métodos, para cada gama de valores de ângulo de atrito considerados.

De um modo geral, a segunda comparação revelou registarem-se maiores diferenças de área, para qualquer uma das classes, entre as duas metodologias. Tal pode ser derivado de a gama de valores de ângulo de atrito nos cenários 20 e 21 ser mais ampla (22° a 33,7°) que a dos cenários 18 e 19 (28° a 32°).

Nas duas comparações, a avaliação determinística com componente estocástica apresenta uma subestimação do valor das áreas incondicionalmente estáveis e uma sobrestimação das áreas incondicionalmente instáveis. Ou seja, a avaliação determinística com componente estocástica devolve resultados mais conservativos que a avaliação determinística absoluta. Tal acontece precisamente por advir do cálculo com valores mais conservativos de parâmetros condicionadores da instabilidade, neste caso o ângulo de atrito. A variação é maior para a classe incondicionalmente instável, pois esta depende apenas do ângulo de atrito, enquanto que a classe incondicionalmente estável também é influenciada pelo valor do peso volúmico do solo (valor absoluto), que acaba por atenuar a diferença de valores.

Tabela 5.16a – Resumo dos valores obtidos entre os dois tipos de avaliação (cenários 1, 18 e 19), para um peso volúmico de 20 kN.m⁻³, e as respectivas diferenças.

Tipo de avaliação	φ (°)	Incond. estável		Incond. instável	
		m ²	%	m ²	%
Absoluta	30	1 127 875	72,63	44 900	2.89
Com componente estocástica	[28-32]	1 127 475	72,61	47 425	3.05
Diferença		400	0,03	-2525	-0,16

Tabela 5.16b – Resumo dos valores obtidos entre os dois tipos de avaliação (cenários 1, 4 a 7, 20 e 21), para um peso volúmico de 20 kN.m⁻³, e as respectivas diferenças.

Tipo de avaliação	φ (°)	Incond. estável		Incond. instável	
		m ²	%	m ²	%
Absoluta	27,85	1 070 583	68,95	74 652	4.81
Com componente estocástica	[22,0-33,7]	1 060 450	68,29	98 500	6.34
Diferença		10 133	0,65	-23 848	-1,54

5.2.1.2 Parâmetros hidrológicos/hidrogeológicos

Nas Tabelas 5.17a e 5.17b, 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 $\log(q/T)$ (Tabela 5.2), pois a equação utilizada para o cálculo da recarga efectiva crítica (Equação 4.15) é baseada na equação apresentada pelo SHALSTAB (Equação 4.14), obtendo-se assim uma percepção global da estabilidade em caso de comparação dos resultados, entre os diferentes cenários, pelas duas metodologias.

Tabela 5.17a - Resultados referentes às classes de recarga 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) $0 < q_{crit} < 10$	123 450	8.0	51 850	3.3	335 250	21.6
(2) $10 < q_{crit} < 20$	204 375	13.2	148 600	9.6	66 325	4.3
(3) $20 < q_{crit} < 40$	39 400	2.5	33 675	2.2	10 025	0.6
(4) $40 < q_{crit} < 79$	12 800	0.8	12 725	0.8	2 675	0.2
(5) $79 < q_{crit} < 158$	0	0.0	325	0.0	0	0.0
(6) $q_{crit} > 158$	0	0.0	0	0.0	0	0.0

Tabela 5.17a - 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

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.

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 ($\varphi = 28^\circ$ a 32°) e 20 ($\varphi = 22,0^\circ$ 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 efectiva crítica 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 (Tabelas 5.18a e 5.18b).

Nas Tabelas 5.18a e 5.18b, as amostras referem-se a conjuntos de classes cujo valor de recarga efectiva crítica é inferior a 10 mm.dia^{-1} (i.e. classe 1) e inferior a 20 mm.dia^{-1} (i.e. classes 1 e 2). As tabelas apresentam a área das classes ditas não incondicionais, ou seja, as que não sejam incondicionalmente estáveis ou instáveis, em metros quadrados e percentagem da área de estudo. Também apresenta os valores das áreas para valores de recarga efectiva crítica inferior a 10 e 20 mm.dia^{-1} , em metros quadrados e a sua percentagem relativa na área não incondicional.

Tabela 5.18a – Valores obtidos nos cenários 1, 16 e 17, das áreas em classes não incondicionais e área das amostras em metros quadrados e percentagem das áreas não incondicionais.

q_{crit} (mm.dia^{-1})	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	< 10	< 20	< 10	< 20	< 10	< 20
Área das classes não incondicionais (m^2)	380 025		247 175		414 275	
Área das classes não incondicionais (%)	24,5		15,9		26,7	
Soma da amostra (m^2)	123 450	327 825	51 850	200 450	335 250	401 575
Amostra nas áreas não incondicionais (%)	32,5	86,3	21,0	81,1	80,9	96,9

Tabela 5.18b – Valores obtidos nos cenários 18 a 21, das áreas em classes não incondicionais e área das amostras em metros quadrados e percentagem das áreas não incondicionais.

q_{crit} (mm.dia^{-1})	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	< 10	< 20	< 10	< 20	< 10	< 20	< 10	< 20
Área das classes não incondicionais (m^2)	377 900		377 875		393 850		393 850	
Área das classes não incondicionais (%)	24,3		24,3		25,4		25,4	
Soma da amostra (m^2)	136 250	329 200	156 775	326 950	187 375	359 200	199 675	355 525
Amostra nas áreas não incondicionais (%)	36,1	87,1	41,5	86,5	47,6	91,2	50,7	90,3

No cenário 1, 380 025 metros quadrados de terreno não pertencem a classes extremas, correspondendo a 24,5% da área de estudo. Destes 380 025 metros quadrados, 123 450 metros quadrados (32,5% da área não incondicional) contêm um valor de recarga efectiva crítica inferior a 10

mm.dia⁻¹. Considerando os mesmos 380 025 metros quadrados de terreno, 327 825 metros quadrados (86,3% da área não incondicional) contêm um valor de recarga efectiva crítico inferior a 20 mm.dia⁻¹.

Isto quer dizer que, teoricamente, 32,5% da área não incondicional (cerca de 8,0% da área de estudo) se torna instável para valores de recarga efectiva de 10 mm.dia⁻¹. Acrescentando os 44 900 metros quadrados considerados incondicionalmente instáveis por causa do valor do declive, tem-se uma área potencialmente instável de 168 350 metros quadrados correspondendo a 10,8% da área de estudo.

No mesmo cenário, para valores de recarga efectiva de 20 mm.dia⁻¹, a área considerada instável, tanto para parâmetros geotécnicos como hidrológicos, sobe para 372 725 metros quadrados correspondendo a 24,0% da área de estudo.

Se se considerar as três primeiras classes, ou seja, para um valor de recarga efectiva crítica de 40 mm.dia⁻¹, os cenários 1, 16 e 17 representam praticamente a totalidade do território não incondicional como instável (97%, 95% e 99% da área não incondicional, respectivamente).

As Tabelas 5.19a e 5.19b, apresentam a área total instável para cada cenário e para cada conjunto de classes de recarga efectiva crítica.

Tabela 5.19a – Valores de área geotécnica e hidrologicamente instável, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, para q_{crit} inferior a 10 mm.dia⁻¹ (classe 1) e q_{crit} inferior a 20 mm.dia⁻¹ (classes 1 e 2), nos cenários 1, 16 e 17.

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$
Área instável (m ²)	168 350	372 725	65 800	214 400	558 100	624 425
Área instável (% da área de estudo)	10,8	24,0	4,2	13,8	35,9	40,2

Tabela 5.19b – Valores de área geotécnica e hidrologicamente instável, em metros quadrados e percentagem da área de estudo, para q_{crit} inferior a 10 mm.dia⁻¹ (classe 1) e q_{crit} inferior a 20 mm.dia⁻¹ (classes 1 e 2), nos cenários 18 a 21.

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$	$q_{crit} < 10$	$q_{crit} < 20$
Área instável (m ²)	183 675	376 625	204 200	374 375	285 875	457 700	298 175	454 025
Área instável (% da área de estudo)	11,8	24,3	13,2	24,1	18,4	29,5	19,2	29,2

A análise das Tabelas 5.19a e 5.19b permite verificar que para o caso do cenário 17 (i.e. o cenário com os parâmetros mais conservadores), a diferença entre a área instável para valores de recarga efectiva de 10 e 20 mm.dia⁻¹ é pequena, de 35,9% e 40,2% da área estudada, respectivamente. Neste caso, para recargas de 10 mm.dia⁻¹, cerca de um terço da área de estudo é considerada instável. Este valor corresponde a praticamente a totalidade da área de estudo se não se considerar as zonas incondicionalmente estáveis que representam 59% da área total estudada.

5.2.2 Comparação entre as técnicas de modelação

Michel et al. (2012) propõem uma comparação dos modelos adoptados tendo por base os seus resultados em função da modelação inerente aos programas SHALSTAB e SINMAP.

Assim, assumem que para o modelo SHALSTAB, a área instável é representada pela classe “incondicionalmente instável” (Tabela 4.1) ou por $\log(q/T) < -3,4$ (Tabela 4.2). Para o modelo SINMAP, assumem que a área instável é representada pela classe “incondicionalmente instável” (Equação 4.20) ou por um índice de estabilidade SI inferior a uma unidade (Tabela 4.3).

A $\log(q/T) = -3,4$ corresponde, para $T = 25 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$, um valor de recarga efectiva de $10 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$. Assim, os dados de estabilidade, SI, dos cenários 18 a 21 são referentes a $q = 10 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ para se poder proceder à comparação de áreas instáveis.

Na Tabela 5.20 são apresentados os dados referentes aos cenários 1, 18 e 19. A estabilidade do cenário 1 foi avaliada em função de $\log(q/T)$ e a dos cenários 18 e 19, em função da estabilidade SI. Na Tabela 5.21 são apresentados os dados referentes aos cenários 20 e 21 e ao cenário 27,9°. Este cenário apresenta-se parametrizado da mesma maneira que o cenário 1, excepto no valor de ângulo de atrito que neste caso adquire o valor de 27,9° (i.e. a média dos valores limite de ângulo de atrito dos cenários 20 e 21). Os valores a negrito são aqueles que se assumem como pertencentes a zonas instáveis.

Tabela 5.20 – Dados referentes à estabilidade em função de $\log(q/T)$ (cenário 1) e à estabilidade SI (cenários 18 e 19), em metros quadrados e percentagem da área de estudo.

	Cenário 1			Cenário 18		Cenário 19	
	m ²	%		m ²	%	m ²	%
Incondicionalmente instável	44 900	2,9	Incondicionalmente estável	1 359 975	87,6	1 255 925	80,9
$\log(q/T) < -3,4$	123 450	8,0	$1,25 < SI < 1,5$	0	0,0	0	0,0
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	204 375	13,2	$1 < SI < 1,25$	9 000	0,6	725	0,0
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	39 100	2,5	$0,5 < SI < 1$	8 150	0,5	675	0,0
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	13 100	0,8	$0 < SI < 0,5$	0	0,0	0	0,0
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	0	0,0	Incondicionalmente instável	175 675	11,3	295 475	19,0
$\log(q/T) > -2,2$	0	0,0					
Incondicionalmente estável	1 127 875	72,6					

Tabela 5.21 – Dados referentes à estabilidade em função de $\log(q/T)$ (cenário 27,9°) e à estabilidade SI (cenários 20 e 21), em metros quadrados e percentagem da área de estudo.

	Cenário 27,9°			Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	%		m ²	%	m ²	%
Incondicionalmente instável	77 725	5,0	Incondicionalmente estável	1 127 425	72,6	1 179 200	75,9
$\log(q/T) < -3,4$	156 500	10,1	$1,25 < SI < 1,5$	38 950	2,5	20 625	2,4
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	221 725	14,3	$1 < SI < 1,25$	114 400	7,4	50 425	4,0
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	19 750	1,3	$0,5 < SI < 1$	143 550	9,2	46 775	1,2
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	6 475	0,4	$0 < SI < 0,5$	0	0,0	0	0,0
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	0	0,0	Incondicionalmente instável	128 475	8,3	255 775	16,5
$\log(q/T) > -2,2$	0	0,0					
Incondicionalmente estável	1 070 625	68,9					

O cenário 1 (com $\varphi = 30^\circ$ e $T = 25 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$) perfaz assim um total de 168 350 metros quadrados (10,8%) de terreno considerado instável contra 183 825 (11,8%) e 296 150 (19,1%) metros quadrados dos cenários 18 (com $\varphi = 28^\circ$ a 32° e $T = 20$ a $30 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$) e 19 (com $\varphi = 28^\circ$ a 32° e $T = 15$ a $35 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$), respectivamente. Na segunda comparação, o cenário 27,9° (com $\varphi = 27,85^\circ$ e $T = 25 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$) perfaz um total de 234 225 metros quadrados (15,1%) de terreno considerado instável contra 272 025 (17,5%) e 302 550 (17,7%) metros quadrados dos cenários 20 (com $\varphi = 22,0^\circ$ a $33,7^\circ$ e $T = 20$ a $30 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$) e 21 (com $\varphi = 22,0^\circ$ a $33,7^\circ$ e $T = 15$ a $35 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$), respectivamente.

Embora baseados em princípios semelhantes, os modelos apresentam valores de áreas consideradas instáveis diferentes, pois em qualquer das comparações efectuadas, a área instável afectada pela metodologia SINMAP é sempre maior que a da metodologia SHALSTAB. De acordo com Michel et al. (2012), tal ocorre devido ao processo de calibração de recarga efectiva utilizado e à tipologia de cada modelo. O SHALSTAB é um modelo determinístico no qual a resposta é dada em termos de ocorrência de rotura ou não. O seu processo de calibração, ou seja, a individualização da classe $\log(q/T) < -3,4$, fez com que houvesse uma redução significativa de área instável na área de estudo pois para certos autores (e.g. Witt, 2005), a área instável inclui a classe $\log(q/T) < -3,2$.

Por seu lado, o SINMAP é um modelo probabilístico cuja resposta é dada em termos de probabilidade de falha. A distribuição probabilística realiza diversas combinações com os dados de entrada, o que faz com que as áreas que apresentam probabilidade de rotura ocupem uma área consideravelmente elevada (Michel et al., 2012).

5.2.3 Avaliação da susceptibilidade a movimentos de terreno nos bairros da Vertente Sul de Odivelas e avaliação preliminar do risco

Foi efectuada uma avaliação da recarga efectiva crítica para cada bairro da designada Vertente Sul de Odivelas de modo a obter-se uma avaliação mais específica da susceptibilidade aos movimentos de terreno e o seu impacto nos bairros considerados. As Figuras 5.34 a 5.38 apenas consideram o cenário 1, por ser o que apresenta as condições médias do terreno ($\varphi = 30^\circ$, $\gamma_h = 20 \text{ kN.m}^{-3}$ e $T = 25 \text{ m}^2.\text{dia}^{-1}$).

Os dados respeitantes à recarga efectiva crítica nos bairros Quinta das Arrombas, Serra da Luz, Quinta do José Luís, Encosta da Luz e Vale do Forno, para os cenários 1 e 16 a 21, são apresentados no Anexo IV. Os dados estão divididos em duas classes incondicionais (i.e. incondicionalmente estável e incondicionalmente instável) e as restantes oito, não incondicionais.

Aquelas oito classes são adaptadas das classes de recarga efectiva crítica apresentados em 5.2.1, cujos limites de recarga efectiva são por sua vez baseados nos das classes de estabilidade $\log(q/T)$ (Tabela 5.2). Optou-se por apresentar os valores obtidos repartidos por um maior número de classes, pois estes encontravam-se bastante aglomerados nas primeiras classes (i.e. classes 1 e 2 das Tabelas 5.17a e 5.17b) em detrimento das restantes, que abrangem valores de recarga efectiva crítica superiores a 20 mm.dia^{-1} . Também se juntou as classes 5 e 6 pois na área de estudo nunca é atingido um valor de recarga efectiva crítica superior a 158 mm.dia^{-1} .

Os dados são assim apresentados para valores limites de recarga efectiva crítica de 5, 10, 15, 20, 30, 40 e 79 mm.dia^{-1} . Os valores a negrito pertencem às classes com maior predominância de área afectada, sendo que se teve em conta as classes da Tabela 5.17, ou seja, para valores limites de recarga efectiva crítica de 10, 20, 40, 79 e 158 mm.dia^{-1} .

De um modo geral, os bairros Quinta das Arrombas, Serra da Luz e Quinta do José Luís seguem um padrão de predominância de classe de recarga efectiva crítica semelhante ao da área de estudo completa. Ou seja, nestes bairros, para os cenários 1, 16, 18 e 19, as classes predominantes são as que contêm um valor de recarga efectiva crítica entre 10 e 20 mm.dia^{-1} e, para os cenários 17, 20 e 21, valores de recarga efectiva crítica inferiores a 10 mm.dia^{-1} . É de salientar que os cenários que apresentam maior área com recarga efectiva crítica inferior a 10 mm.dia^{-1} , são aqueles que apresentam os parâmetros mais conservadores (cenário 17) e gamas mais abrangentes de ângulo de atrito (cenários 20 e 21) e transmissividade (cenário 21).

Por seu lado, o bairro Encosta da Luz apresenta, para os cenários 1 e 16, maior área de valor de recarga efectiva crítica com o valor compreendido entre 10 e 20 mm.dia^{-1} . Os restantes cenários, 17 a 21, contêm maior área de valores de recarga efectiva crítica inferiores a 10 mm.dia^{-1} .

Por fim, o bairro Vale do Forno apresenta-se como o que tem maior área considerada estável pois em todos os cenários, excepto o mais conservativo (cenário 17), contém áreas com valores de recarga efectiva crítica entre 40 e 79 mm.dia^{-1} .

A Tabela 5.22 apresenta os resultados de área total, fracção representativa na área de estudo, área instável e percentagem de área instável no bairro, para cada bairro discriminado.

Tabela 5.22 – Resultados de área total, área instável em metros quadrados e percentagem da área de estudo, em cada bairro, para o cenário 1.

	área (m ²)	% área de estudo	área instável (m ²)	% do bairro
Quinta das Arrombas	33 150	2,1	4 375	13,2
Serra da Luz	236 275	15,2	25 150	10,6
Quinta do José Luís	149 100	9,6	18 500	12,4
Encosta da Luz	184 575	11,9	30 675	16,6
Vale do Forno	237 200	15,3	58 675	24,7

A partir dos dados recolhidos pelo Instituto Nacional de Estatística nos Censos 2011 (INE, 2011) é possível obter uma ordem de grandeza do número de edifícios e respectivos residentes nas zonas mais críticas de cada bairro.

O bairro Quinta das Arrombas situa-se inteiramente na subsecção 02 / secção 016 da freguesia da Pontinha (BRGI – 11160501701). Esta subsecção conta com 371 residentes em 38 edifícios (op. cit.). No entanto, a grande maioria dos edifícios encontra-se na área considerada incondicionalmente estável uma vez que a ocupação urbanística se situa na parte mais baixa.

O bairro Serra da Luz apresenta a sua área mais instável (com zonas incondicionalmente instáveis) na subsecção 01 / secção 017 da freguesia da Pontinha (BRGI – 11160501701). A subsecção referenciada contém 78 edifícios e 609 residentes (op. cit.).

O bairro Quinta do José Luís, também pertencente à freguesia da Pontinha, tem como áreas mais instáveis as pertencentes às subsecções 11 e 12 da secção 010 (BRGI – 11160501011 e 11160501012, respectivamente), com maior área instável verificada nesta última. A subsecção 11 tem 22 edifícios e 53 residentes, e a subsecção 12, 8 edifícios com 14 residentes (op. cit.). No entanto, a maioria dos edifícios da subsecção 11 encontram-se na zona mais baixa e os da subsecção 12 estão situados na zona E da subsecção, ou seja, já pertencente ao bairro Encosta da Luz (Andrade et al., 2012).

O bairro Encosta da Luz apresenta mais instabilidade na subsecção 09 / secção 088 da freguesia de Odivelas (BRGI – 11160308809). Esta subsecção contém 26 edifícios e 105 residentes (INE, 2011).

O bairro Vale do Forno, também pertencente à freguesia de Odivelas, e apresenta áreas instáveis em várias subsecções: subsecção 02 / secção 088 (BRGI – 11160308802) e subsecções 05, 06 e 07 da secção 079 (BRGI – 11160307905, 11160307906 e 11160307907, respectivamente). A subsecção 02 da secção 088 contém 23 edifícios e 131 residentes, e as subsecções da secção 079 contêm 19 edifícios e 97 residentes, 9 edifícios e 28 residentes e 25 edifícios e 221 residentes, respectivamente (op. cit.).

De um modo geral, os bairros mais afectados pela instabilidade potencial do terreno são os bairros Serra da Luz (78 edifícios e cerca de 600 residentes), Encosta da Luz (26 edifícios e 105 residentes) e Vale do Forno (cerca de 75 edifícios e 480 residentes), perfazendo um total de perto de 180 edifícios e 1180 pessoas afectadas.

5.2.4 Análise comparativa com a REN e o PDM de Odivelas e com os máximos de precipitação na região de Lisboa

Nesta secção são apresentadas duas análises distintas. A primeira centra-se na comparação dos resultados obtidos a partir de um cenário médio (cenário 1) com as recomendações para a delimitação da Reserva Ecológica Nacional (REN), no caso específico de áreas de instabilidade de vertentes e as recomendações de zonamento de aptidão à construção do Plano Director Municipal (PDM) de Odivelas.

Depois são apresentados os máximos de precipitação diária na região de Lisboa, no período de Janeiro de 2001 a Agosto de 2014, para uma melhor contextualização dos dados apresentados nos diversos cenários.

5.2.4.1 Comparação de resultados com as recomendações para a delimitação da REN municipal e do zonamento para a aptidão à construção do PDM de Odivelas

Ao comparar o mapa da Figura 5.34 com o correspondente ao cenário 1 (i.e. o cenário que contém valores médios) (Figura 5.35), é possível verificar que o mapa da zona de estudo com os limiares de declive críticos derivado das recomendações da REN apresenta menos área estável que o mapa do cenário 1, 54,4% e 72,6%, respectivamente. A dimensão de área estável, em REN, é apenas igualada à do cenário 1, quando se considere as áreas com declive entre 10 e 15 graus como estáveis, 68,8% e 72,6%, respectivamente (Tabela 5.23).

Tabela 5.23 – Comparação entre os dados do mapa de declives críticos das recomendações da REN com os dados do mapa de estabilidade $\log(q/T)$ no cenário 1.

Declive	Classe de $\log(q/T)$	REN		Cenário 1	
		m ²	%	m ²	%
> 15°	Incondicionalmente instável	484 750	31,2	44 900	2,9
	Instabilidade elevada			123 450	8,0
	Instável			204 375	13,2
10° - 15°	Instabilidade moderada	217 375	14,0	39 100	2,5
	Metaestável			13 100	0,8
< 10°	Estabilidade moderada	850 675	54,8	0	0,0
	Estável			0	0,0
	Incondicionalmente estável			1 127 875	72,6

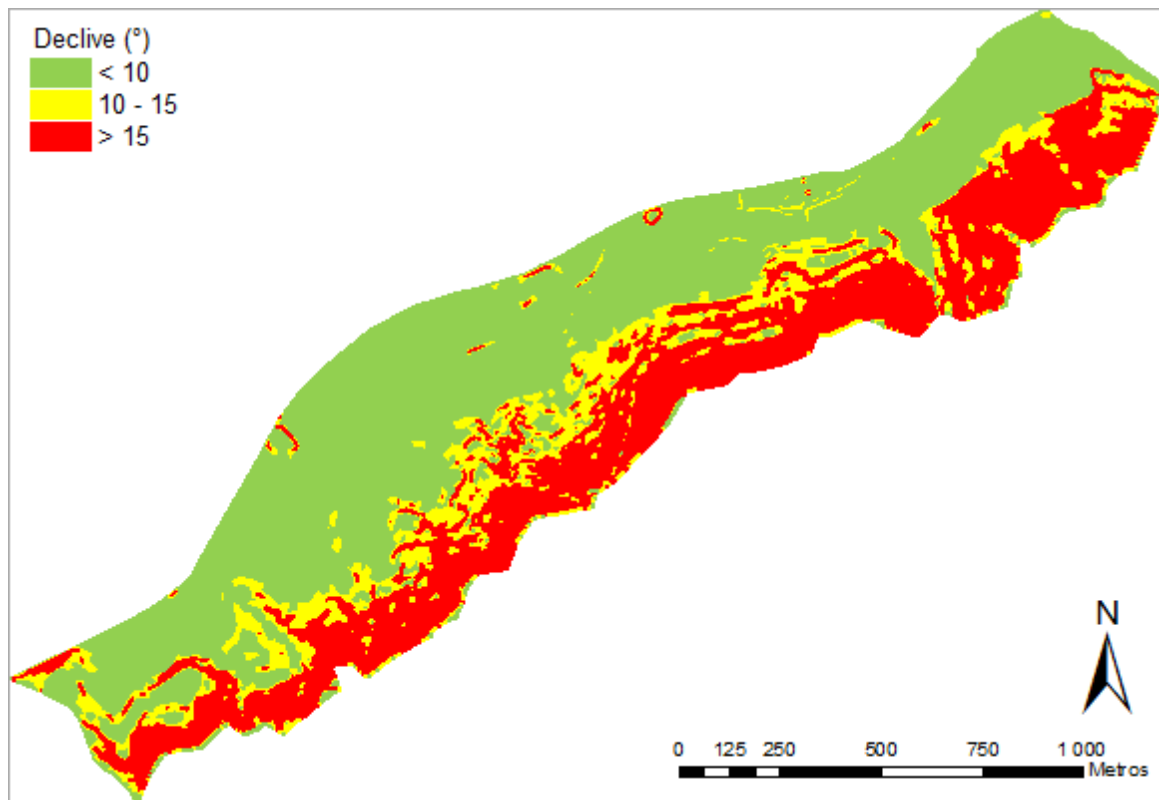


Figura 5.34 – Mapa da zona de estudo com os limiares de declive críticos para rochas sedimentares detríticas e plásticas.

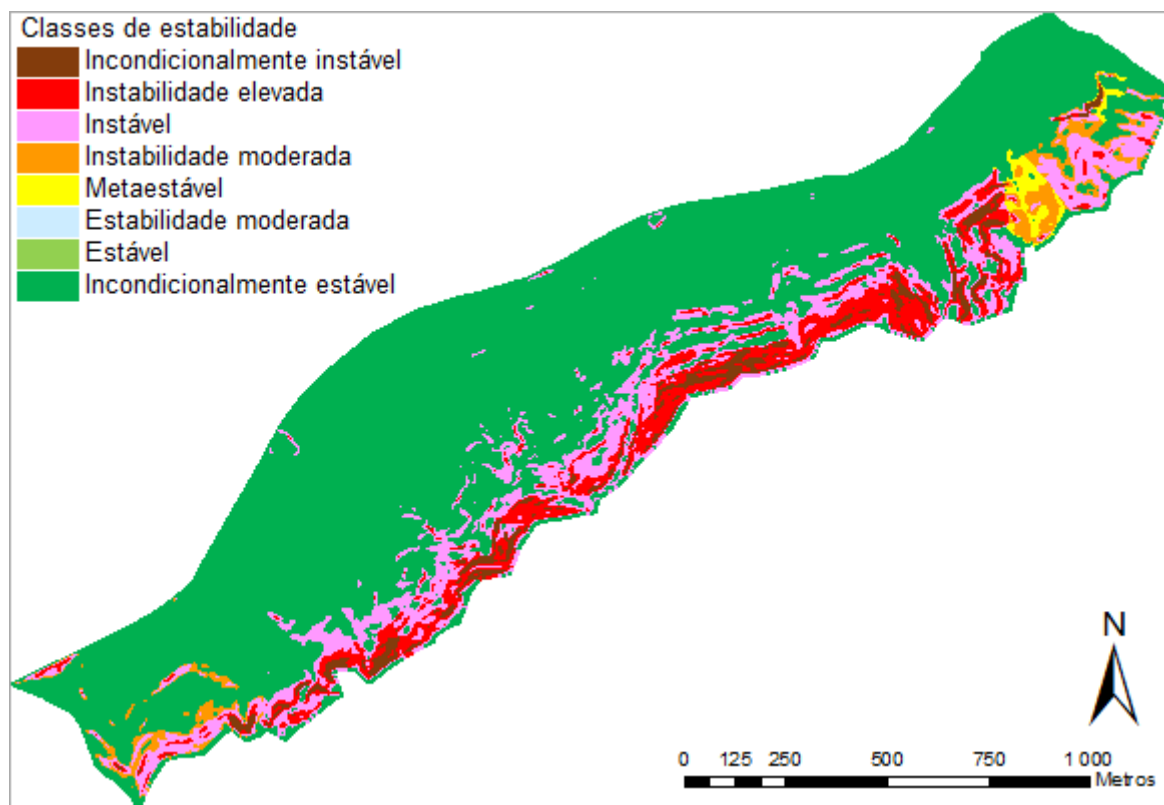


Figura 5.35 – Mapa com as classes de estabilidade $\log(q/T)$ no cenário 1.

Ao fazer o mesmo exercício de comparação com os dados de estabilidade $\log(q/T)$, verifica-se que as recomendações de delimitação das zonas de aptidão propostas também apresentam um valor de área estável inferior aos dos resultados obtidos no cenário 1, 50,2% e 72,6% respectivamente (Figura 5.36; Tabela 5.24). No entanto, em termos de instabilidade, os estudos de orientação delimitam como zona instável uma área com mais do dobro do tamanho da considerada para o cenário 1, ou seja, 6,7% e 2,9% da área estudada, respectivamente.

Tabela 5.24 - Comparação entre os resultados do mapa de declives das zonas de aptidão à construção com os dados do mapa de estabilidade $\log(q/T)$ no cenário 1.

Declive	Classe de $\log(q/T)$	Estudo de orientação		Cenário 1	
		m ²	%	m ²	%
> 50%	Incondicionalmente instável	103 300	6,7	44 900	2,9
25% - 50%	Instabilidade elevada	424 275	27,3	123 450	8,0
	Instável			204 375	13,2
15% - 25%	Instabilidade Moderada	245 575	15,8	39 100	2,5
	Metaestável			13 100	0,8
	Estabilidade moderada			0	0,0
< 15%	Estável	779 650	50,2	0	0,0
	Incondicionalmente estável			1 127 875	72,6

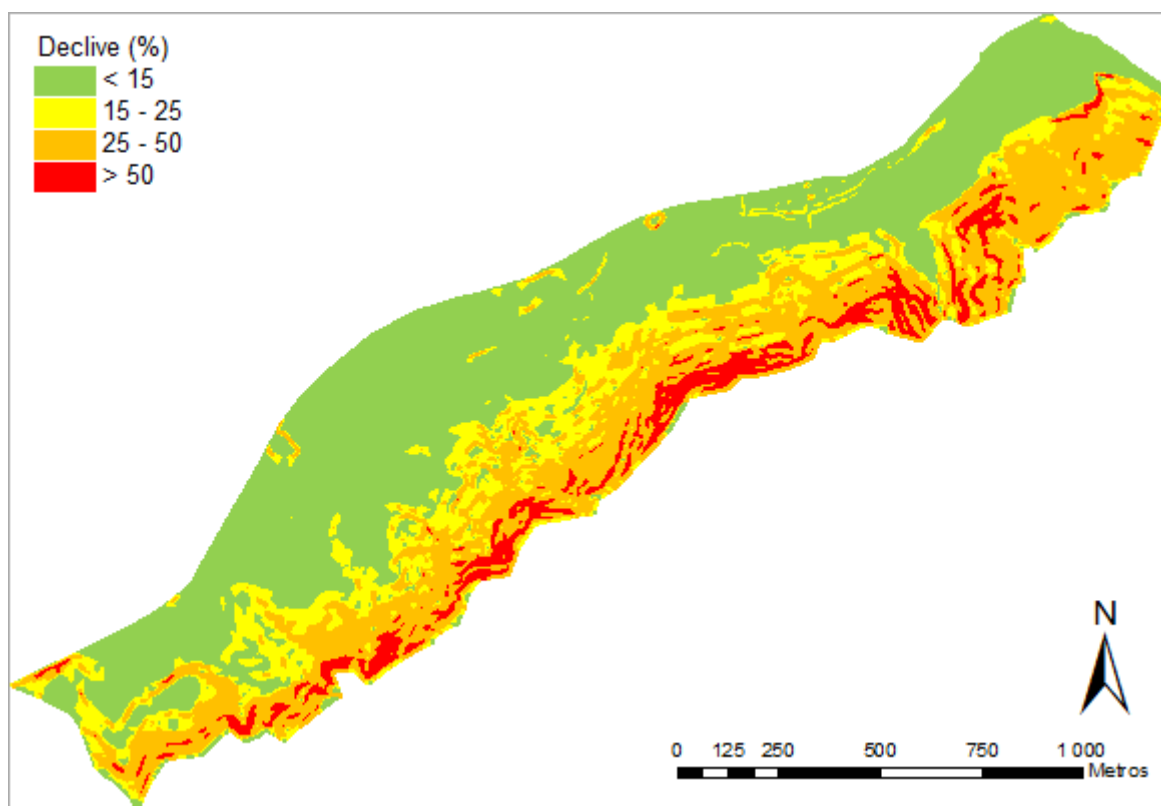


Figura 5.36 – Mapa com as zonas de aptidão à construção recomendadas no estudo de orientação para o planeamento do concelho de Odivelas (Costa Lobo & Pardal, 2003).

5.2.4.2 Máximos de precipitação para a região de Lisboa

Para uma melhor apreciação da estabilidade em função da recarga efectiva, são apresentadas as ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia⁻¹ para o período compreendido entre Janeiro de 2001 e Agosto de 2014, repartidas pelas Tabelas V.A a V.C do Anexo V. Estes valores de precipitação diária são referentes aos dados pluviométricos obtidos na estação do Instituto D. Luíz (IDL, 2014a).

Os valores de precipitação a negrito são os que estão compreendidos entre 40 e 79 mm.dia⁻¹ e os valores a negrito e sublinhados são os superiores a 79 mm.dia⁻¹.

A rápida análise das Tabelas V.A a V.C do Anexo V, permite verificar que os episódios de precipitação superiores a 20 mm.dia⁻¹ não são incomuns na região de Lisboa e acontecem sobretudo entre os meses de Setembro/Outubro e Março/Abril, com prevalência nos meses de Outubro e Novembro.

Os episódios de precipitação diária superior a 40 mm.dia⁻¹ são mais raros, mas têm acontecido pelo menos uma vez por ano, à excepção do ano de 2009, sendo que o mais produtivo neste aspecto foi o ano de 2010, totalizando 9 dias de precipitação diária superior a 40 mm.dia⁻¹.

No período considerado, ou seja, de Janeiro de 2001 a Agosto de 2014, houve 5 episódios de precipitação diária a exceder 79 mm.dia⁻¹. Estes ocorreram a 29 de Janeiro de 2004 (85,5 mm.dia⁻¹), 18 de Fevereiro de 2008 (102,4 mm.dia⁻¹), 15 de Fevereiro de 2010 (79,6 mm.dia⁻¹), 6 de Dezembro de 2012 (91,4 mm.dia⁻¹) e 23 de Outubro de 2013 (89,5 mm.dia⁻¹).

A Tabela 5.25 mostra os valores de precipitação diária máxima, em cada mês, para o período de 1960 a 1990 e os que já ultrapassaram aqueles registos excepcionais, no período de Janeiro de 2001 a Agosto de 2014. Em pouco mais de uma década houve, portanto, um aumento significativo dos valores de precipitação diária máximos, comparativamente ao período de 1960 a 1990, favorecendo assim as condições de instabilização da Vertente Sul de Odivelas.

Os dados da Tabela 5.25 comprovam que a acção das alterações climáticas tem sido sentida em território nacional, nomeadamente na região da grande Lisboa, provocando cada vez mais ocorrências de episódios de precipitação atmosférica intensa. Estes valores crescentes de precipitação curta e intensa, associados a episódios de escorregamentos translacionais superficiais, têm o potencial de induzir movimentos de terreno de consequências nefastas nas zonas urbanas consideradas (Zêzere et al., 2005; Piedade et al., 2011).

No caso particular do dia 22 de Setembro de 2014, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, 2014) refere que, a partir da análise de imagens de radar, é provável que em alguns locais da cidade de Lisboa os valores de precipitação possam ter sido mais elevados que o registado pela estação do Instituto D. Luíz (13,2 mm em 2 horas) e superado o valor de 20 mm.h⁻¹ entre as 13 e as 15 horas locais. Numa análise preliminar, também é possível indicar que, em alguns locais da cidade de Lisboa e zonas arredores, a precipitação possa ter, nesse dia, ultrapassado 40 mm em 2 horas.

Tabela 5.25 - Informação sobre os valores climatológicos para o período de 1960 a 1990 e de 2001 a Agosto de 2014 (adaptado de IDL, 2014b).

	Precipitação diária (mm.dia⁻¹)	
	Máx /24h (1960-1990)	(2001 - Ago 2014)
Jan	61,2	<u>85,5</u> (2004)
Fev	65,7	<u>102,4</u> (2008) + <u>79,6</u> (2010)
Mar	<u>82,9</u>	
Abr	49,6	56,7 (2008)
Mai	30,5	36,6 (2009) + 43,2 (2011) + 50,1 (2012)
Jun	37,1	40,0 (2006)
Jul	34,0	
Ago	26,7	27,0 (2003) + 30,8 (2011)
Set	53,8	
Out	<u>91,2</u>	
Nov	<u>95,6</u>	
Dez	56,3	63,3 (2010) + <u>91,4</u> (2012)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

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 & 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).

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.

Na modelação determinística absoluta foram considerados 17 cenários diferentes, com diferentes combinações de parâmetros retirados da literatura, em que os 15 primeiros cenários são derivados das combinações possíveis entre o peso volúmico húmido do solo (19 a 21 kN.m⁻³) e o ângulo de atrito interno (28 a 32°). Estes valores foram obtidos a partir dos dados da Tecnasol (2002, apud Sousa, 2013). Os cenários 16 ($\gamma_h = 22,7 \text{ kN.m}^{-3}$ e $\varphi = 33,7^\circ$) e 17 ($\gamma_h = 19,7 \text{ kN.m}^{-3}$ e $\varphi = 22,0^\circ$) correspondem, respectivamente, ao melhor e pior cenário possível. Estes valores foram retirados do trabalho de Sousa (2013) que expõe os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica por ela realizados.

Para cada cenário foram criados dois tipos diferentes de mapas de estabilidade, baseados na mesma metodologia. Numa primeira fase são apresentados os dados e mapas relativos à estabilidade, da mesma forma que são apresentados pela metodologia SHALSTAB, ou seja, em função do logaritmo da relação hidrológica $\log(q/T)$.

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.

Na mesma metodologia, também foram derivados os mapas de susceptibilidade em função da recarga efectiva para os 17 cenários considerados. Estes mapas são derivados dos efectuados com recurso à equação de estabilidade $\log(q/T)$ e são meramente indicativos da estabilidade da região em função dos seguintes valores de recarga efectiva: 10, 20, 50, 100, 150 e 200 mm.dia⁻¹. De um modo geral, verifica-se que deixa de existir estabilidade em qualquer ponto da área de estudo com valores de recarga efectiva entre 50 e 100 mm.dia⁻¹.

De seguida procedeu-se à avaliação da susceptibilidade pela técnica determinística com componente estocástica. Neste contexto, os valores de transmissividade e ângulo de atrito do solo foram variados em cada célula segundo uma distribuição de probabilidade uniforme. O valor de transmissividade, inicialmente de 25 m².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 a 21.

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.

Para se poder proceder a uma análise de sensibilidade e comparar os resultados obtidos em ambas as técnicas, optou-se por apresentar os resultados dos mapas produzidos com a metodologia de componente estocástica em função da metodologia absoluta, em termos de recarga efectiva crítica.

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 são “incondicionais” têm a sua estabilidade dependente da precipitação. Num cenário médio (cenário 1), 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.

Este trabalho foi, na sua grande maioria, efectuado com recurso ao programa MS Excel, que se caracteriza por ser de utilização acessível e está disponível em qualquer computador que contenha o software Office da Microsoft. Os dados de base utilizados foram apenas um MDT da zona de estudo, tendo os parâmetros de entrada para a avaliação da susceptibilidade sido obtidos a partir da bibliografia.

Assim, após a realização do presente trabalho, é possível referir que, a avaliação determinística da susceptibilidade a movimentos de terreno, neste caso de escorregamentos translacionais superficiais, pode ser calculada com recurso às funcionalidades do MS Excel, sendo, no entanto, uma tarefa bastante minuciosa e que exige conhecimentos avançados na utilização do programa. Porém, a utilização do MS Excel permitiu uma análise mais controlada dos vários cenários pois cada parâmetro e algoritmo tem que ser introduzido manualmente. Tal não acontece com a utilização de programas de análise automáticos, nomeadamente os programas SHALSTAB e SINMAP.

As principais limitações que se prendem com a utilização do MS Excel no desenvolvimento dos mapas de susceptibilidade são:

- O tempo despendido na criação de *layers* para cada parâmetro, na concepção da coordenação entre as diferentes *layer*, na formatação condicional colorida para se poder visualizar os dados em formato de mapas, entre outros;
- A dimensão dos ficheiros, que acabam por ser muito “pesados” e requerem uma boa capacidade de processamento do computador.

A combinação destas limitações impede que a avaliação da susceptibilidade seja feita para áreas demasiado extensas, a não ser que se faça uma partição do terreno, sob pena que o processador em

uso não tenha capacidade de cálculo suficiente. Neste caso, a dimensão da área de estudo (400 × 581 células, ou seja, 2 × 2,905 km) já foi considerada próxima do limite aceitável para o processador utilizado (Intel® Core™ i7 – Quad Core), pois por diversas vezes o processamento dos mapas, em MS Excel, sofreu atrasos consideráveis e até cancelamentos do sistema. No entanto, atendendo à evolução da tecnologia, é de esperar que num futuro próximo esta questão não se coloque para a dimensão de terreno estudada e que cada vez mais se possa enveredar por análises que exijam mais capacidade de processador.

Para trabalho futuro, é proposto que se estabeleça uma base de dados com a inventariação dos movimentos de terreno já ocorridos na região, à semelhança dos trabalhos desenvolvidos por Zêzere (2001) no concelho de Loures, de modo a se poder proceder à validação dos mapas obtidos por via determinística. Com acesso a uma inventariação das instabilidades ocorridas, e utilizando esta como parâmetro de entrada, seria também possível avaliar a susceptibilidade a movimentos de terreno por vias estatísticas.

Também para trabalho futuro, propõe-se a concretização de um estudo de caracterização geológico-geotécnica do terreno, com recurso a sondagens, de modo a se poder produzir mapas simulados por krigagem a partir de dados geotécnicos pontuais. Estes mapas simulados de parâmetros de entrada tais como o peso volúmico húmido ou o ângulo de atrito, representariam de modo mais realista a variabilidade natural das características do terreno.

Para futuro georreferenciamento dos mapas produzidos, aconselha-se a utilização do programa MS Access para importação dos dados no ArcGIS.

Os resultados do trabalho apresentado apenas respondem à pergunta “onde?”. Para uma avaliação completa do risco na zona estudada é necessário prosseguir com tratamentos que envolvam os conceitos de perigosidade, vulnerabilidade e elementos em risco. A perigosidade responde à pergunta “quando?” através da introdução de valores de frequência, magnitude e períodos de retorno dos parâmetros iniciadores da instabilidade (i.e. precipitação e aceleração sísmica). Por sua vez, a vulnerabilidade e os elementos em risco compõem a avaliação final da conceptualização do risco.

Também neste trabalho apenas foi tido em conta a precipitação atmosférica como factor desencadeador de instabilidades e propõe-se o estudo da susceptibilidade a movimentos de terreno em função da aceleração sísmica, como complemento, de modo a se poder obter uma avaliação mais completa da instabilidade na região estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alimohammadlou, Y., Najafi, A., Yalcin, A. (2013). Landslide process and impacts: A proposed classification method. *Catena*. 104: 219–232.
- 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.
- Australian Geomechanics Society (2007a). Practice Note Guidelines for Landslide Risk Management. Australian Geomechanics Society, Landslide Taskforce, Landslide Zoning Working Group. *Australian Geomechanics*, 42(1).
- Australian Geomechanics Society (2007b). The Australian GeoGuides for Slope Management and Maintenance. Australian Geomechanics Society, Landslide Taskforce, Landslide Zoning Working Group. *Australian Geomechanics*, 42(1).
- Australian Geomechanics Society (2007c). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management. Australian Geomechanics Society, Landslide Taskforce, Landslide Zoning Working Group. *Australian Geomechanics*, 42(1).
- Belo-Pereira, M., Dutra, E., Viterbo, P. (2011). Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116.
- Beven, K. & Kirkby, M. (1979). A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1): 43-69.
- Brito, M.G. (n.d.). *Apontamentos de Sistemas de Representação Geológica e Geográfica*. FCT-UNL.
- Cascini, L., Bonnard, C., Corominas, J., Jibson, R., Montero-Olarte, J. (2005). Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development — state of the art report. Em Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide risk management*. (pp 199–235). Amsterdam: A.A. Balkema.
- Cornforth, D. (2005). *Landslides in Practice – Investigations, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Corominas, J. & Mavrouli, O. (2010). SafeLand Deliverable D2.1: Overview of landslide hazard and risk assessment practices. Disponível em: <http://www.safeland-fp7.eu/>
- Corominas, J., & Mavrouli, O. (2011). SafeLand Deliverable D2.4: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment and zoning. Disponível em: <http://www.safeland-fp7.eu/>
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., et al. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Costa Lobo, M. & Pardal, S. (2003). *Estudos de Orientação para o Planeamento do Concelho de Odivelas*. Município de Odivelas. Departamento de planeamento estratégico. Divisão do plano director municipal.
- CRED (2014). EM-DAT: OFDA/CRED International Disaster Database. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, <http://www.em-dat.net/>. Visualizado a 05/03/2014.
- Cruden, D. & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. Em Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.) *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. Washington DC: National Academy Press.

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.

De Blasio, F. (2011). *Introduction to the Physics of Landslides - Lecture Notes on the Dynamics of Mass Wasting*. Springer.

Declaração de Retificação n.º 71/2012 ao Decreto-lei n.º 192 de 3 de Outubro de 2012. *Diário da República n.º 232 - 1.ª série*. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa.

Der Kiureghian, A. & Ditlevsen, O. (2007). *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Risk Acceptance and Risk Communication Workshop. Stanford University.

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*. Visualizado a 08/07/14 em <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>

EPA (2014). *Climate Change Indicators in the United States, 2014*. United States Environmental Protection Agency.

Eslamian, S. (2014). *Handbook of Engineering Hydrology: Modeling, Climate Change, and Variability*. Taylor & Francis Group, Boca Raton.

Food and Agriculture Organization (2012). *State of the World's Forests 2012*. Food and Agriculture Organization, United Nations.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, Ch., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008a) JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102: 85–98.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, Ch., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008b) JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102: 99–111.

Garcia, R. & Zêzere, J. (2003). *Avaliação de Riscos Geomorfológicos: Conceitos, Terminologia e Métodos de Análise*. III Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, Livro de Actas, Vila Real: 299-308.

Geotechnical Engineering Office (2006). *Assessment of landslide risk in natural hillsides in Hong Kong* (Report no. 191). Hong Kong: Hong Kong Geotechnical Engineering Office.

Geotechnical Engineering Office (2011). *Geotechnical manual for slopes*. Hong Kong Geotechnical Engineering Office.

Glade, T. & Crozier, M.J. (2005). A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. Em Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (Eds.), *Landslide hazard and risk*. (pp 75–138) London: Wiley.

Gorsevski, P., Gessler, P., Boll, J., Elliot, W., Foltz, R., (2006). Spatially and temporally distributed modelling of landslide susceptibility. *Geomorphology* 80: 178–198.

Guha-Sapir, D. & Hoyois, P. (2012). *Measuring the Human and Economic Impact of Disasters*. Projecto Foresight. Relatório produzido para Government Office of Science.

Guzzetti, F. (2005). *Landslide Hazard and Risk Assessment – Concepts, Methods and Tools for the Detection and Mapping of Landslides, for Landslide Susceptibility Zonation and Hazard Assessment, and for Landslide Risk Evaluation*. PhD Thesis. University of Bonn.

Henriques, C. (2009). *Dinâmica de vertentes no contexto da Reserva Ecológica Nacional: O caso de estudo do concelho de Caldas da Rainha*. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial aplicados ao Ordenamento pela Universidade de Lisboa.

Hervás, J. & Delattre, M. (2010). SafeLand Deliverable D0.1: Living with landslides: European and International dimensions of the project SafeLand. Disponível em: <http://www.safeland-fp7.eu/>

Highland, L. & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. Circular nº 1325. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

IDL (2014a). Base de dados diária. Instituto D.Luíz. Visualizado a 15/09/14 em <http://idl.ul.pt/node/65>.

IDL (2014b). Normais climatológicas. Instituto D.Luíz. Visualizado a 15/09/14 em <http://idl.ul.pt/node/271>.

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>

International Association of Engineering Geology (1976). *Engineering Geological Maps: a Guide to Their Preparation*. Paris: UNESCO.

International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2004). *Risk assessment – Glossary of terms*. Technical Committee 32: Engineering Practice of Risk Assessment and Management. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

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.

IPMA (2014). Precipitação intensa em Lisboa – 22 de Setembro 2014. Visualizado a 23/09/14 em <http://www.ipma.pt/pt/media/noticias/newsdetail.html?f=/pt/media/noticias/textos/precipitacao-20140922.html>

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.

Julião, R., Nery, F., Ribeiro, J., Branco, M., Zêzere, J. (2009). *Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal*. Autoridade Nacional de Protecção Civil.

Karam, K. (2005). *Landslide Hazards Assessment and Uncertainties*. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.

Lamas, P. (2012). *Apontamentos de Movimentos de Terrenos e Estabilidade de Taludes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

LNEC (2005). *Sismicidade e tectónica em Portugal*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas. Visualizado a 30/09/2014 em <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/tectonica.html>

Malone, A. (1998). Risk management and slope safety in Hong Kong. Em Li, K.S., Kay, J.N., Ho, K.K.S. (Eds.), *Slope engineering in Hong Kong - Proceedings of the annual seminar on slope engineering in Hong Kong* (pp 3–17). Balkema: Brookfield.

Maplecroft (2012). *Climate Change Vulnerability Index – Most at Risk Cities*. Visualizado em http://www.preventionweb.net/files/29649_maplecroftccvisubnationalmap.pdf a 29/09/2014.

Meneses, B. (2011). Susceptibilidade e Risco de Movimentos de Vertente no Concelho de Tarouca. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Geografia Física e Ordenamento do Território pela Universidade de Lisboa.

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.

Morgenstern, N. (1985). Geotechnical Aspects of Environmental Control. Em *Proceedings 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp 155-185) Balkema: Rotterdam.

Nadim, F., Vangelsten, B, Kalsnes, B. (2009). SafeLand Deliverable D8.1: *SafeLand project handbook*. Disponível em: <http://www.safeland-fp7.eu/>

Narasimhan, H., Faber, M., Nadim, F., Vangelsten, B., Sparrevik, M. (2011). SafeLand Deliverable D0.3: Dealing with uncertainties in modelling, prediction, and decision-making. Disponível em: <http://www.safeland-fp7.eu/>

NP EN 1998-1 (2010). *Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade.

OFAT, OFEE, OFEFP (1997). *Recommandations 1997: prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. Berne: OCFIM.

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.

CMO (2009). *Plano Director Municipal de Odivelas, Vol4.1 – Caracterização do Território – Componentes Ambientais*. Câmara Municipal de Odivelas.

Pereira, S., Zêzere, J., Bateira, C. (2012). Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12: 979–988.

Petley, D., Dunning, S., Rosser, N. (2005). The analysis of global landslide risk through the creation of a database of worldwide landslide fatalities. Em Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide risk management*. (pp 367–373). Amsterdam: A.A. Balkema.

Petley, D. (2012). Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding. Visualizado a 09/02/2014 em <http://blogs.agu.org/landslideblog/2012/06/04/landslides-and-engineered-slopes-protecting-society-through-improved-understanding/>

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.

REN-AML (2010). *Reserva Ecológica Nacional da Área Metropolitana de Lisboa*. Quadro de Referência Regional. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo.

Rodrigues, M. (2003). *Classificação de instabilidades de vertentes*. Anotações do Curso de Especialização de Estabilidade de Vertentes e Taludes. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.

Salvação, N., Trigo, R., Câmara, C., Zêzere, J. (2010). Impact of Circulation Weather Types in the study of Landslides in the Northern Lisbon region. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12.

Sidle, R. & Ochiai, H. (2006). *Landslides - Processes, Prediction, and Land Use*. Washington: American Geophysical Union.

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.

Schuster, R. (1996). Socioeconomic Significance of Landslides. Em Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides - Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. Washington DC: National Academy Press.

Schuster, R. & Highland, L. (2007). The Third Hans Cloos Lecture. Urban Landslides: Socioeconomic Impacts and Overview of Mitigative Strategies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 66: 1-27.

Silva, A.P. (2000). Cartografia Geotécnica do Concelho de Almada e o Sistema de Informação Geo-Almada. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geotecnica, na especialidade de Geologia de Engenharia.

Soeters, R. & Van Westen, C. (1996). Slope instability: recognition, analysis and zonation. Em Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.) *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. Washington DC: National Academy Press.

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.

Tecnasol (2002). Complexo desportivo da Paiã (Odivelas). Estudo geológico-geotécnico. Amadora. 35 pp.

Terzaghi (1950). Mechanism of landslides. Em Paige, S. (Ed.), *Application of Geology to Engineering Practice*. The Geological Society of America, Engineering Geology, Berkeley, pp. 83–123.

Trigo, R., Zêzere, J., Rodrigues, M., Trigo, I. (2005). The Influence of the North Atlantic Oscillation on Rainfall Triggering of Landslides near Lisbon. *Natural Hazards*, 36: 331–354.

United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2009). *Terminology of Disaster Risk Reduction*. International Strategy for Disaster Reduction – The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Genebra: Nações Unidas. Visualizado a 02/04/2014 em <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>

Van Westen, C., Castellanos, E., Kuriakose, S. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*, 102: 112–131.

Van Westen, C., Rengers, N., Terlien, M., Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86: 404-414.

- Van Westen, C., Van Asch, T., Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65: 167–184.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. Em Schuster, R. & Krizek, R. (Eds.), *Landslides - Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report 176. Washington DC: National Academy Press.
- Varnes, D. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazard Series*, vol3. Paris: UNESCO.
- 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. (2001). *Distribuição e ritmo dos movimentos de vertente na Região a Norte de Lisboa* (Relatório nº. 38). Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.
- Zêzere, J., (2002). Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2: 73–82.
- Zêzere, J., Ferreira, A., Rodrigues, M. (1999). The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 30 (1-2): 133-146.
- Zêzere, J., Tavares, A., Bateira, C., Trigo, R. (n.d.). *DISASTER - Desastres Naturais de origem Hidro-Geomorfológica em Portugal: Base de Dados SIG para apoio à decisão no ordenamento do território e planeamento de emergência*. XII Colóquio Ibérico de Geografia.
- 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.
- Zhou, Q. & Liu, X. (2004). Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Computers & Geosciences*, 30(4): 369–378.
- 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.

ANEXOS

ANEXO I - Estabilidade em função de $\log(q/T)$ para os cenários 2 a 15

		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Incondicionalmente instável		4,49	2,9	4,49	2,9	7,50	4,8	5,84	3,8	3,19	2,1	2,32	1,5	7,50	4,8
$\log(q/T) < -3,4$	Instabilidade elevada	11,33	7,3	13,72	8,8	15,43	9,9	14,00	9,0	11,11	7,2	9,47	6,1	14,17	9,1
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	Instável	18,23	11,7	23,45	15,1	22,01	14,2	21,29	13,7	19,56	12,6	19,14	12,3	19,67	12,7
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	Instabilidade moderada	4,21	2,7	3,13	2,0	2,22	1,4	3,11	2,0	4,58	2,9	4,66	3,0	2,86	1,8
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	Metaestável	1,37	0,9	1,14	0,7	0,69	0,4	0,99	0,6	1,51	1,0	1,75	1,1	0,83	0,5
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	Estabilidade moderada	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
$\log(q/T) > -2,2$	Estável	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
Incondicionalmente estável		115,65	74,5	109,36	70,4	107,44	69,2	110,06	70,9	115,33	74,3	117,94	76,0	110,26	71,0

		Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Incondicionalmente instável		5,84	3,8	3,19	2,1	2,32	1,5	7,50	4,8	5,84	3,8	3,19	2,1	2,32	1,5
$\log(q/T) < -3,4$	Instabilidade elevada	12,93	8,3	10,17	6,5	8,67	5,6	17,04	11,0	15,35	9,9	12,13	7,8	10,55	6,8
$-3,4 < \log(q/T) < -3,1$	Instável	18,74	12,1	17,66	11,4	17,44	11,2	24,11	15,5	24,41	15,7	22,24	14,3	21,25	13,7
$-3,1 < \log(q/T) < -2,8$	Instabilidade moderada	3,60	2,3	4,37	2,8	4,28	2,8	1,85	1,2	2,02	1,3	4,31	2,8	4,96	3,2
$-2,8 < \log(q/T) < -2,5$	Metaestável	1,12	0,7	1,57	1,0	1,69	1,1	0,57	0,4	0,83	0,5	1,47	0,9	1,72	1,1
$-2,5 < \log(q/T) < -2,2$	Estabilidade moderada	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
$\log(q/T) > -2,2$	Estável	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
Incondicionalmente estável		113,05	72,8	118,33	76,2	120,89	77,9	104,22	67,1	106,85	68,8	111,94	72,1	114,49	73,7

Tabela I.A - Dados das classes de estabilidade $\log(q/T)$ dos cenários 2 a 15, em hectares e percentagem da área total.

ANEXO II - Estabilidade em função da recarga efectiva para os
cenários 2 a 15

Tabela II.A – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 2 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 156 525	115,65	74,5	1 156 525	115,65	74,5	1 156 525	115,65	74,5
Estável	238 075	23,81	15,3	55 775	5,58	3,6	1 725	0,17	0,1
Instável	113 300	11,33	7,3	295 600	29,56	19,0	349 650	34,97	22,5
Incondicionalmente instável	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 156 525	115,65	74,5	1 156 525	115,65	74,5	1 156 525	115,65	74,5
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	351 375	35,14	22,6	351 375	35,14	22,6	351 375	35,14	22,6
Incondicionalmente instável	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9

Tabela II.B – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 3 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 093 575	109,36	70,4	1 093 575	109,36	70,4	1 093 575	109,36	70,4
Estável	277 150	27,72	17,8	42 700	4,27	2,7	2 350	0,24	0,2
Instável	137 175	13,72	8,8	371 625	37,16	23,9	411 975	41,20	26,5
Incondicionalmente instável	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 093 575	109,36	70,4	1 093 575	109,36	70,4	1 093 575	109,36	70,4
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	414 325	41,43	26,7	414 325	41,43	26,7	414 325	41,43	26,7
Incondicionalmente instável	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9	44 900	4,49	2,9

Tabela II.C – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 4 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 074 375	107,44	69,2	1 074 375	107,44	69,2	1 074 375	107,44	69,2
Estável	249 150	24,92	16,0	29 100	2,91	1,9	2 200	0,22	0,1
Instável	154 300	15,43	9,9	374 350	37,44	24,1	401 250	40,13	25,8
Incondicionalmente instável	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 074 375	107,44	69,2	1 074 375	107,44	69,2	1 074 375	107,44	69,2
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	403 450	40,35	26,0	403 450	40,35	26,0	403 450	40,35	26,0
Incondicionalmente instável	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8

Tabela II.D – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 5 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 100 550	110,06	70,9	1 100 550	110,06	70,9	1 100 550	110,06	70,9
Estável	253 825	25,38	16,3	40 925	4,09	2,6	2 125	0,21	0,1
Instável	140 025	14,00	9,0	352 925	35,29	22,7	391 725	39,17	25,2
Incondicionalmente instável	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 100 550	110,06	70,9	1 100 550	110,06	70,9	1 100 550	110,06	70,9
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	393 850	39,39	25,4	393 850	39,39	25,4	393 850	39,39	25,4
Incondicionalmente instável	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8

Tabela II.E – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 6 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 153 300	115,33	74,3	1 153 300	115,33	74,3	1 153 300	115,33	74,3
Estável	256 500	25,65	16,5	60 900	6,09	3,9	1 825	0,18	0,1
Instável	111 075	11,11	7,2	306 675	30,67	19,7	365 750	36,58	23,6
Incondicionalmente instável	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 153 300	115,33	74,3	1 153 300	115,33	74,3	1 153 300	115,33	74,3
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	367 575	36,76	23,7	367 575	36,76	23,7	367 575	36,76	23,7
Incondicionalmente instável	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1

Tabela II.F – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 7 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 179 400	117,94	76,0	1 179 400	117,94	76,0	1 179 400	117,94	76,0
Estável	255 450	25,55	16,5	64 025	6,40	4,1	1 650	0,17	0,1
Instável	94 725	9,47	6,1	286 150	28,62	18,4	348 525	34,85	22,4
Incondicionalmente instável	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 179 400	117,94	76,0	1 179 400	117,94	76,0	1 179 400	117,94	76,0
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	350 175	35,02	22,6	350 175	35,02	22,6	350 175	35,02	22,6
Incondicionalmente instável	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5

Tabela II.G – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 8 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia-1			q = 20 mm.dia-1			q = 50 mm.dia-1		
	m2	ha	%	m2	ha	%	m2	ha	%
Incondicionalmente estável	1 102 575	110,26	71,0	1 102 575	110,26	71,0	1 102 575	110,26	71,0
Estável	233 525	23,35	15,0	36 875	3,69	2,4	1 950	0,20	0,1
Instável	141 725	14,17	9,1	338 375	33,84	21,8	373 300	37,33	24,0
Incondicionalmente instável	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8

	q = 100 mm.dia-1			q = 150 mm.dia-1			q = 200 mm.dia-1		
	m2	ha	%	m2	ha	%	m2	ha	%
Incondicionalmente estável	1 102 575	110,26	71,0	1 102 575	110,26	71,0	1 102 575	110,26	71,0
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	375 250	37,53	24,2	375 250	37,53	24,2	375 250	37,53	24,2
Incondicionalmente instável	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8

Tabela II.H – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 9 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia ⁻¹			q = 20 mm.dia ⁻¹			q = 50 mm.dia ⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 130 500	113,05	72,8	1 130 500	113,05	72,8	1 130 500	113,05	72,8
Estável	234 600	23,46	15,1	47 200	4,72	3,0	1 875	0,19	0,1
Instável	129 300	12,93	8,3	316 700	31,67	20,4	362 025	36,20	23,3
Incondicionalmente instável	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8

	q = 100 mm.dia ⁻¹			q = 150 mm.dia ⁻¹			q = 200 mm.dia ⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 130 500	113,05	72,8	1 130 500	113,05	72,8	1 130 500	113,05	72,8
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	363 900	36,39	23,4	363 900	36,39	23,4	363 900	36,39	23,4
Incondicionalmente instável	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8

Tabela II.I – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 10 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 183 275	118,33	76,2	1 183 275	118,33	76,2	1 183 275	118,33	76,2
Estável	235 925	23,59	15,2	59 325	5,93	3,8	1 500	0,15	0,1
Instável	101 675	10,17	6,5	278 275	27,83	17,9	336 100	33,61	21,6
Incondicionalmente instável	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 183 275	118,33	76,2	1 183 275	118,33	76,2	1 183 275	118,33	76,2
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	337 600	33,76	21,7	337 600	33,76	21,7	337 600	33,76	21,7
Incondicionalmente instável	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1

Tabela II.J – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 11 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 208 875	120,89	77,9	1 208 875	120,89	77,9	1 208 875	120,89	77,9
Estável	234 025	23,40	15,1	59 600	5,96	3,8	5 300	0,53	0,3
Instável	86 675	8,67	5,6	261 100	26,11	16,8	315 400	31,54	20,3
Incondicionalmente instável	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 208 875	120,89	77,9	1 208 875	120,89	77,9	1 208 875	120,89	77,9
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	320 700	32,07	20,7	320 700	32,07	20,7	320 700	32,07	20,7
Incondicionalmente instável	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5

Tabela II.L – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 12 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 042 175	104,22	67,1	1 042 175	104,22	67,1	1 042 175	104,22	67,1
Estável	265 225	26,52	17,1	24 150	2,42	1,6	2 275	0,23	0,1
Instável	170 425	17,04	11,0	411 500	41,15	26,5	433 375	43,34	27,9
Incondicionalmente instável	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 042 175	104,22	67,1	1 042 175	104,22	67,1	1 042 175	104,22	67,1
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	435 650	43,57	28,1	435 650	43,57	28,1	435 650	43,57	28,1
Incondicionalmente instável	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8	74 975	7,50	4,8

Tabela II.M – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 13 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 068 450	106,85	68,8	1 068 450	106,85	68,8	1 068 450	106,85	68,8
Estável	272 450	27,25	17,5	28 400	2,84	1,8	2 425	0,24	0,2
Instável	153 500	15,35	9,9	397 550	39,76	25,6	423 525	42,35	27,3
Incondicionalmente instável	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 068 450	106,85	68,8	1 068 450	106,85	68,8	1 068 450	106,85	68,8
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	425 950	42,60	27,4	425 950	42,60	27,4	425 950	42,60	27,4
Incondicionalmente instável	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8	58 400	5,84	3,8

Tabela II.N – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 14 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 119 350	111,94	72,1	1 119 350	111,94	72,1	1 119 350	111,94	72,1
Estável	280 250	28,03	18,0	57 825	5,78	3,7	2 275	0,23	0,1
Instável	121 275	12,13	7,8	343 700	34,37	22,1	399 250	39,93	25,7
Incondicionalmente instável	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 119 350	111,94	72,1	1 119 350	111,94	72,1	1 119 350	111,94	72,1
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	401 525	40,15	25,9	401 525	40,15	25,9	401 525	40,15	25,9
Incondicionalmente instável	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1	31 925	3,19	2,1

Tabela II.O – Dados dos mapas de estabilidade para o cenário 15 em função da recarga efectiva.

	q = 10 mm.dia⁻¹			q = 20 mm.dia⁻¹			q = 50 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 144 850	114,49	73,7	1 144 850	114,49	73,7	1 144 850	114,49	73,7
Estável	279 250	27,93	18,0	66 775	6,68	4,3	2 025	0,20	0,1
Instável	105 475	10,55	6,8	317 950	31,80	20,5	382 700	38,27	24,6
Incondicionalmente instável	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5

	q = 100 mm.dia⁻¹			q = 150 mm.dia⁻¹			q = 200 mm.dia⁻¹		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%	m ²	ha	%
Incondicionalmente estável	1 144 850	114,49	73,7	1 144 850	114,49	73,7	1 144 850	114,49	73,7
Estável	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Instável	384 725	38,47	24,8	384 725	38,47	24,8	384 725	38,47	24,8
Incondicionalmente instável	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5	23 225	2,32	1,5

ANEXO III - Recarga efectiva crítica para os cenários 2 a 15

Tabela III.A - Dados referentes às classes de recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹), em hectares e percentagem da área total, nos cenários 2 a 15.

	Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Incondicionalmente instável	4,49	2,9	4,49	2,9	7,50	4,8	5,84	3,8	3,19	2,1	2,32	1,5	7,50	4,8
0 < q _{crit} < 10	11,33	7,3	13,72	8,8	15,43	9,9	14,00	9,0	11,11	7,2	9,47	6,1	14,17	9,1
10 < q _{crit} < 20	18,23	11,7	23,45	15,1	22,01	14,2	21,29	13,7	19,56	12,6	19,14	12,3	19,67	12,7
20 < q _{crit} < 40	4,23	2,7	3,16	2,0	2,24	1,4	3,12	2,0	4,62	3,0	4,67	3,0	2,88	1,9
40 < q _{crit} < 79	1,35	0,9	1,11	0,7	0,67	0,4	0,97	0,6	1,48	0,9	1,73	1,1	0,81	0,5
79 < q _{crit} < 158	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
q _{crit} > 158	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
Incondicionalmente estável	115,65	74,5	109,36	70,4	107,44	69,2	110,06	70,9	115,33	74,3	117,94	76,0	110,26	71,0

	Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Incondicionalmente instável	5,84	3,8	3,19	2,1	2,32	1,5	7,50	4,8	5,84	3,8	3,19	2,1	2,32	1,5
0 < q _{crit} < 10	12,93	8,3	10,17	6,5	2,90	1,9	6,15	4,0	15,35	9,9	12,13	7,8	10,55	6,8
10 < q _{crit} < 20	18,74	12,1	17,66	11,4	5,77	3,7	10,89	7,0	24,41	15,7	22,24	14,3	21,25	13,7
20 < q _{crit} < 40	3,64	2,3	4,39	2,8	13,33	8,6	17,88	11,5	2,05	1,3	4,34	2,8	4,99	3,2
40 < q _{crit} < 79	1,09	0,7	1,55	1,0	4,12	2,7	6,23	4,0	0,79	0,5	1,45	0,9	1,69	1,1
79 < q _{crit} < 158	0,00	0,0	0,00	0,0	3,92	2,5	0,31	0,2	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
q _{crit} > 158	0,00	0,0	0,00	0,0	2,04	1,3	2,11	1,4	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
Incondicionalmente estável	113,05	72,8	118,33	76,2	120,89	77,9	104,22	67,1	106,85	68,8	111,94	72,1	114,49	73,7

ANEXO IV – Recarga efectiva crítica nos bairros da Vertente Sul de
Odivelas para o cenário 1

Quinta das Arrombas

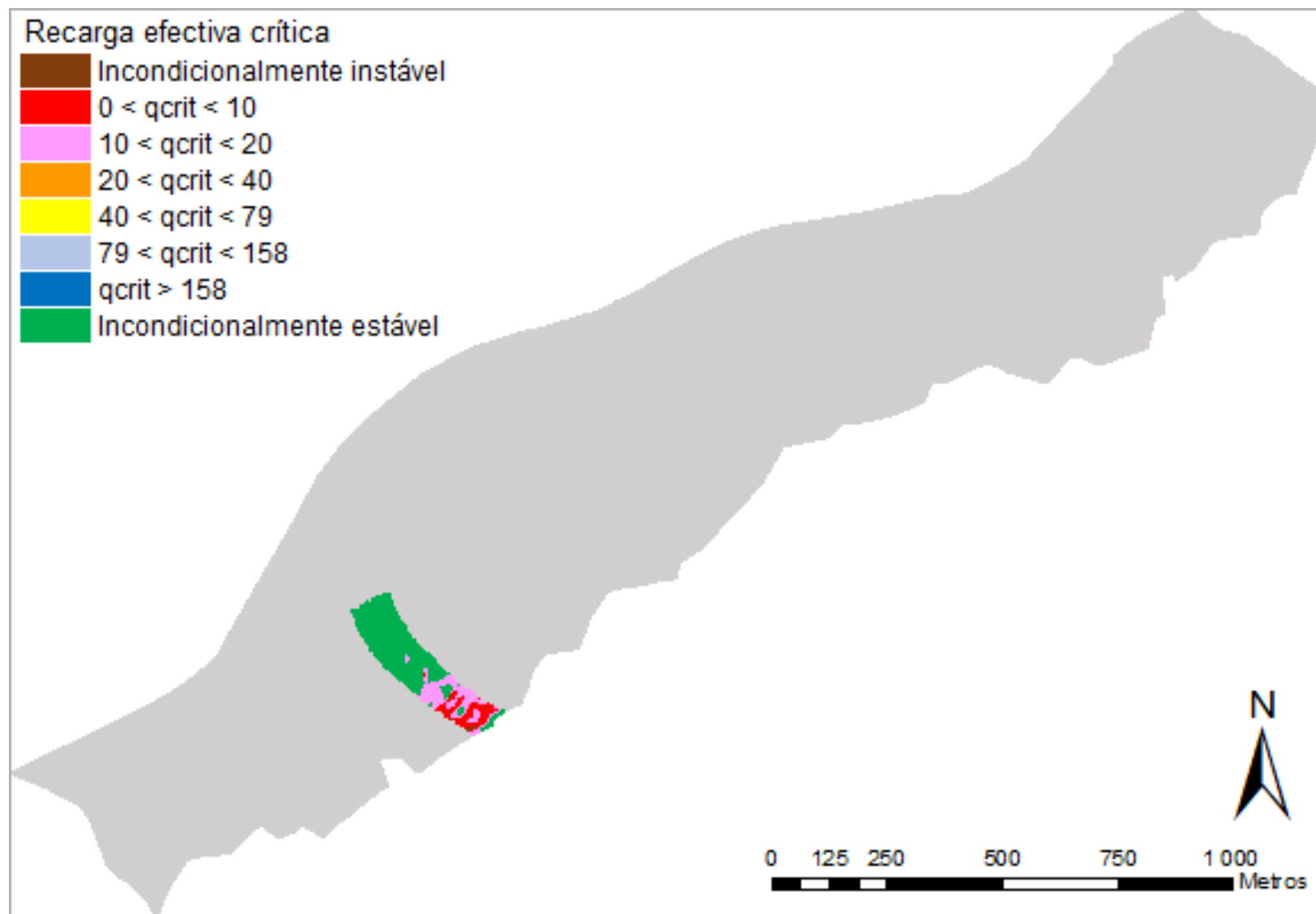


Figura IV.A – Mapa da recarga efectiva crítica ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) no bairro Quinta das Arrombas para o cenário 1.

Tabela IV.A – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia^{-1}) no bairro Quinta das Arrombas, para os cenários 1 e 16 a 21.

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	325	1,0	50	0,2	5 500	16,6
0 < q _{crit} < 5	725	2,2	50	0,2	3 400	10,2
(1)						
5 < q _{crit} < 10	3 325	10,0	475	1,4	6 225	18,8
10 < q _{crit} < 15	6 800	20,5	3 200	9,6	0	0,0
(2)						
15 < q _{crit} < 20	0	0,0	3 075	9,3	0	0,0
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	0	0,0	0	0,0
(3)						
30 < q _{crit} < 40	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
(5) + (6)						
Incondicionalmente estável	21 975	66,3	26 275	79,3	18 025	54,4

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	300	0,9	300	0,9	1 650	5,0	1 650	5,0
0 < q _{crit} < 5	1 200	3,6	1 475	4,4	1 600	4,8	1 975	6,0
(1)								
5 < q _{crit} < 10	3 275	9,9	3 550	10,7	4 275	12,9	3 925	11,8
10 < q _{crit} < 15	5 475	16,5	3 950	11,9	3 950	11,9	3 325	10,0
(2)								
15 < q _{crit} < 20	725	2,2	1 675	5,1	575	1,7	1 125	3,4
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	25	0,1	0	0,0	50	0,2
(3)								
30 < q _{crit} < 40	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
(5) + (6)								
Incondicionalmente estável	22 175	66,9	22 175	66,9	21 100	63,7	21 100	63,6

Serra da Luz

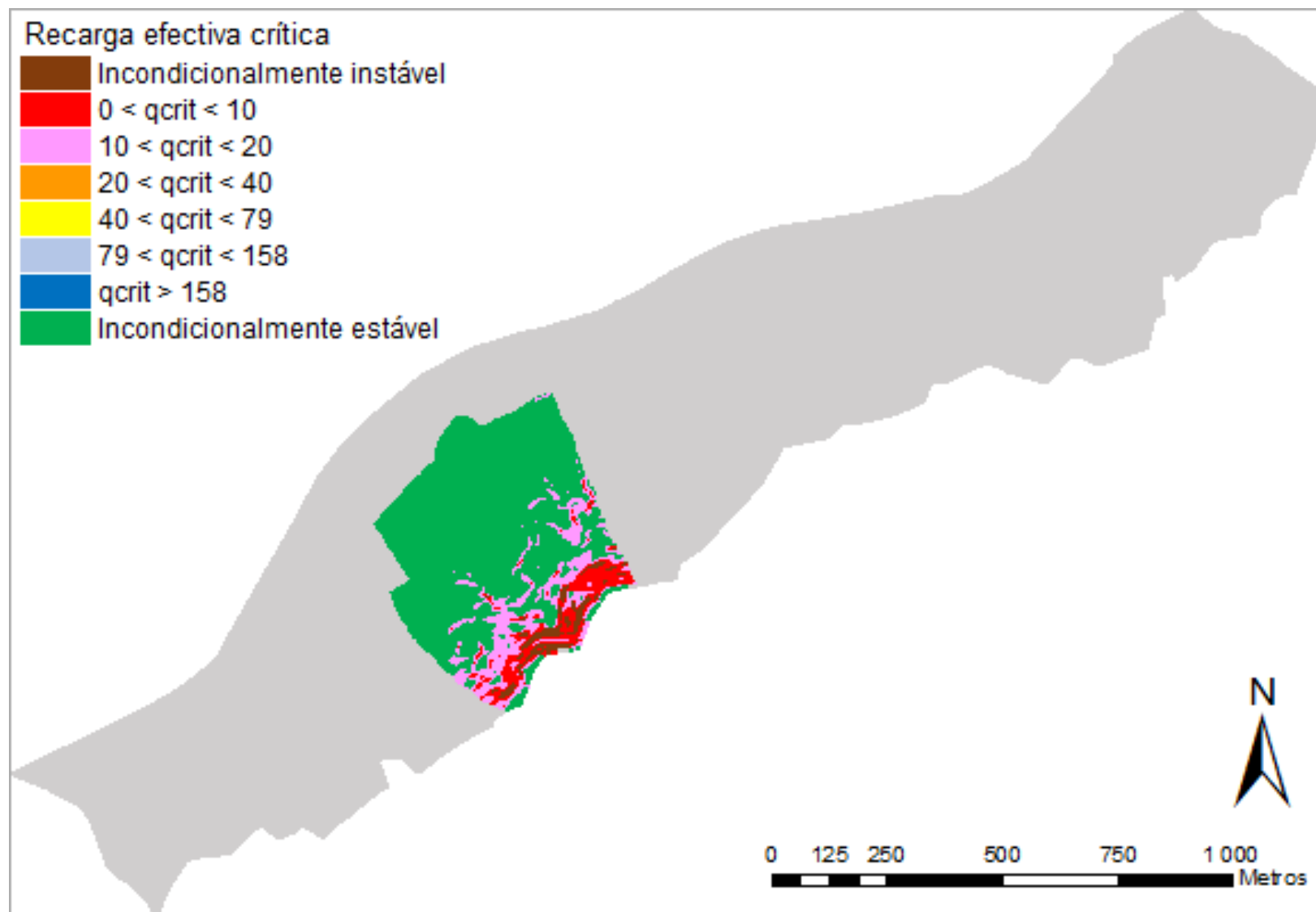


Figura IV.B – Mapa da recarga efectiva crítica ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) no bairro Serra da Luz para o cenário 1.

Tabela IV.B – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹) no bairro Serra da Luz, para os cenários 1 e 16 a 21.

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	7 700	3,3	3 225	1,4	30 675	13,0
0 < q _{crit} < 5	6 400	2,7	1 900	0,8	12 750	5,4
5 < q _{crit} < 10	11 050	4,7	5 275	2,2	51 800	21,9
10 < q _{crit} < 15	32 825	13,9	11 200	4,8	3 750	1,6
15 < q _{crit} < 20	0	0,0	13 750	5,8	0	0,0
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	0	0,0	0	0,0
30 < q _{crit} < 40	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	178 300	75,4	200 925	85,0	137 300	58,1

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	8 175	3,5	8 175	3,5	14 325	6,1	14 325	6,1
0 < q _{crit} < 5	6 050	2,6	6 450	2,7	9 150	3,9	9 575	4,1
5 < q _{crit} < 10	13 025	5,5	17 275	7,3	20 300	8,6	22 925	9,7
10 < q _{crit} < 15	25 800	10,9	16 800	7,1	24 700	10,4	18 875	8,0
15 < q _{crit} < 20	5 275	2,2	9 375	4,0	3 325	1,4	5 775	2,4
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	250	0,1	0	0,0	325	0,1
30 < q _{crit} < 40	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	177 950	75,3	177 950	75,3	164 475	69,6	164 475	69,6

Quinta do José Luís

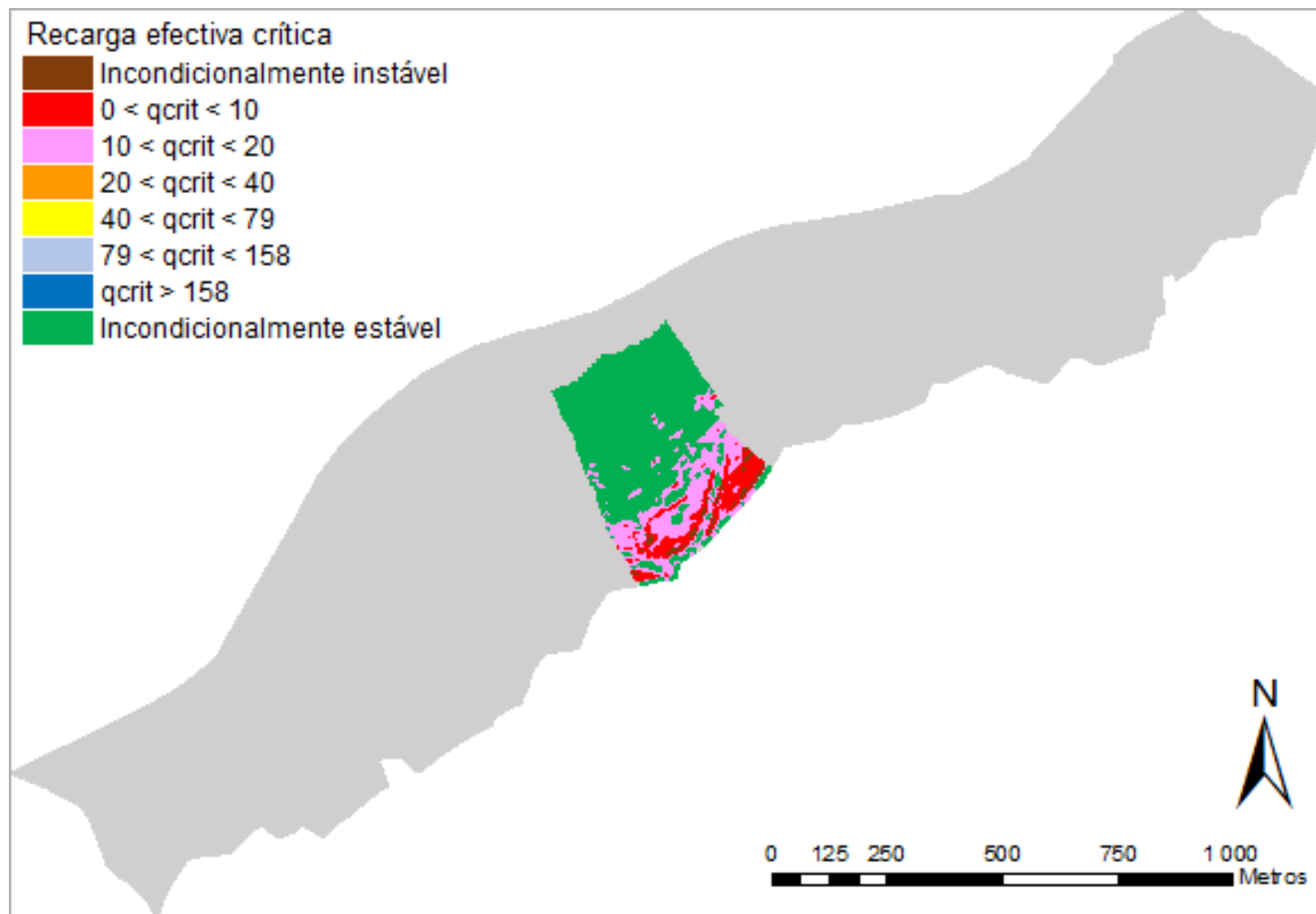


Figura IV.C – Mapa da recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹) no bairro Quinta do José Luís para o cenário 1.

Tabela IV.C – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹) no bairro Quinta do José Luís, para os cenários 1 e 16 a 21.

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	2 875	1,9	400	0,3	23 525	15,8
0 < q _{crit} < 5	4 825	3,2	1 025	0,7	12 300	8,2
5 < q _{crit} < 10 (1)	10 800	7,2	3 175	2,1	39 225	26,3
10 < q _{crit} < 15	31 550	21,2	10 575	7,1	3 850	2,6
15 < q _{crit} < 20 (2)	0	0,0	12 850	8,6	0	0,0
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	0	0,0	0	0,0
30 < q _{crit} < 40 (3)	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79 (4)	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79 (5) + (6)	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	99 050	66,4	121 075	81,2	70 225	47,1

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	3 275	2,2	3 275	2,2	9 175	6,2	9 175	6,2
0 < q _{crit} < 5	5 425	3,6	5 800	3,9	7 675	5,1	8 075	5,4
5 < q _{crit} < 10 (1)	11 725	7,9	14 600	9,8	17 500	11,7	19 125	12,8
10 < q _{crit} < 15	23 350	15,7	16 375	11,0	21 000	14,1	16 500	11,1
15 < q _{crit} < 20 (2)	5 825	3,9	9 075	6,1	3 100	2,1	5 125	3,4
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	450	0,3	0	0,0	425	0,3
30 < q _{crit} < 40 (3)	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79 (4)	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79 (5) + (6)	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	99 525	66,7	99 525	66,8	90 675	60,8	90 675	60,8

Encosta da Luz

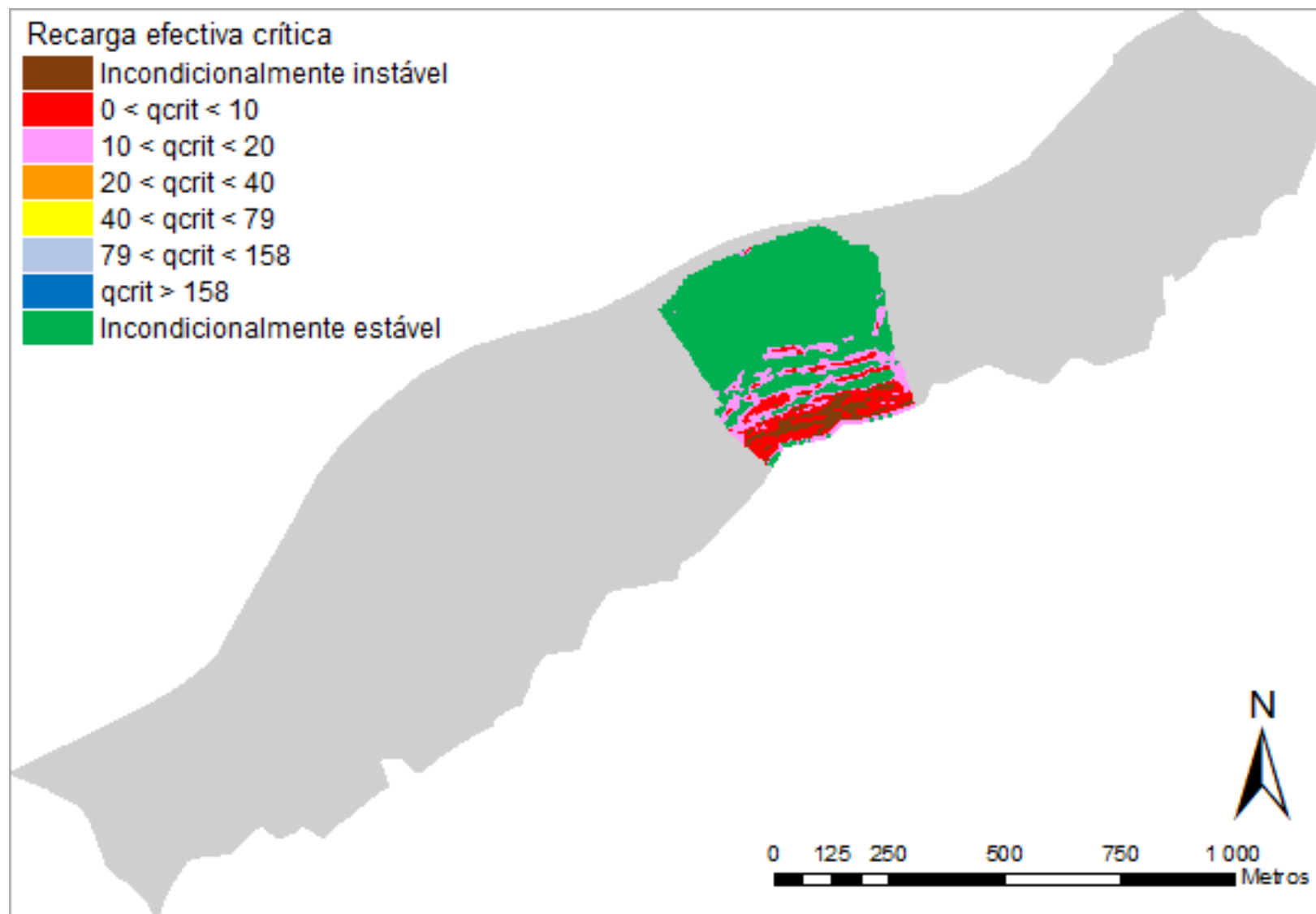


Figura IV.D - Mapa da recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹) no bairro Encosta da Luz para o cenário 1.

Tabela IV.D – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹) no bairro Encosta da Luz, para os cenários 1 e 16 a 21.

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	9 575	5,2	1 400	0,8	33 125	18,0
0 < q _{crit} < 5	8 850	4,8	3 575	1,9	10 325	5,6
5 < q _{crit} < 10	12 250	6,6	9 950	5,4	36 200	19,6
10 < q _{crit} < 15	22 375	12,1	14 275	7,7	200	0,1
15 < q _{crit} < 20	0	0,0	7 825	4,3	0	0,0
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	0	0,0	0	0,0
30 < q _{crit} < 40	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	131 525	71,3	147 525	79,9	104 700	56,7

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	9 500	5,1	9 500	5,2	16 800	9,1	16 800	9,1
0 < q _{crit} < 5	9 175	5,0	9 975	5,4	9 700	5,2	10 325	5,6
5 < q _{crit} < 10	14 025	7,6	16 125	8,7	19 600	10,6	19 925	10,8
10 < q _{crit} < 15	19 225	10,4	13 000	7,0	14 950	8,1	12 300	6,6
15 < q _{crit} < 20	1 500	0,8	4 750	2,6	1 025	0,6	2 600	1,4
20 < q _{crit} < 30	0	0,0	50	0,0	0	0,0	125	0,1
30 < q _{crit} < 40	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
40 < q _{crit} < 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	131 150	71,1	131 150	71,1	122 500	66,4	122 500	66,4

Vale do Forno

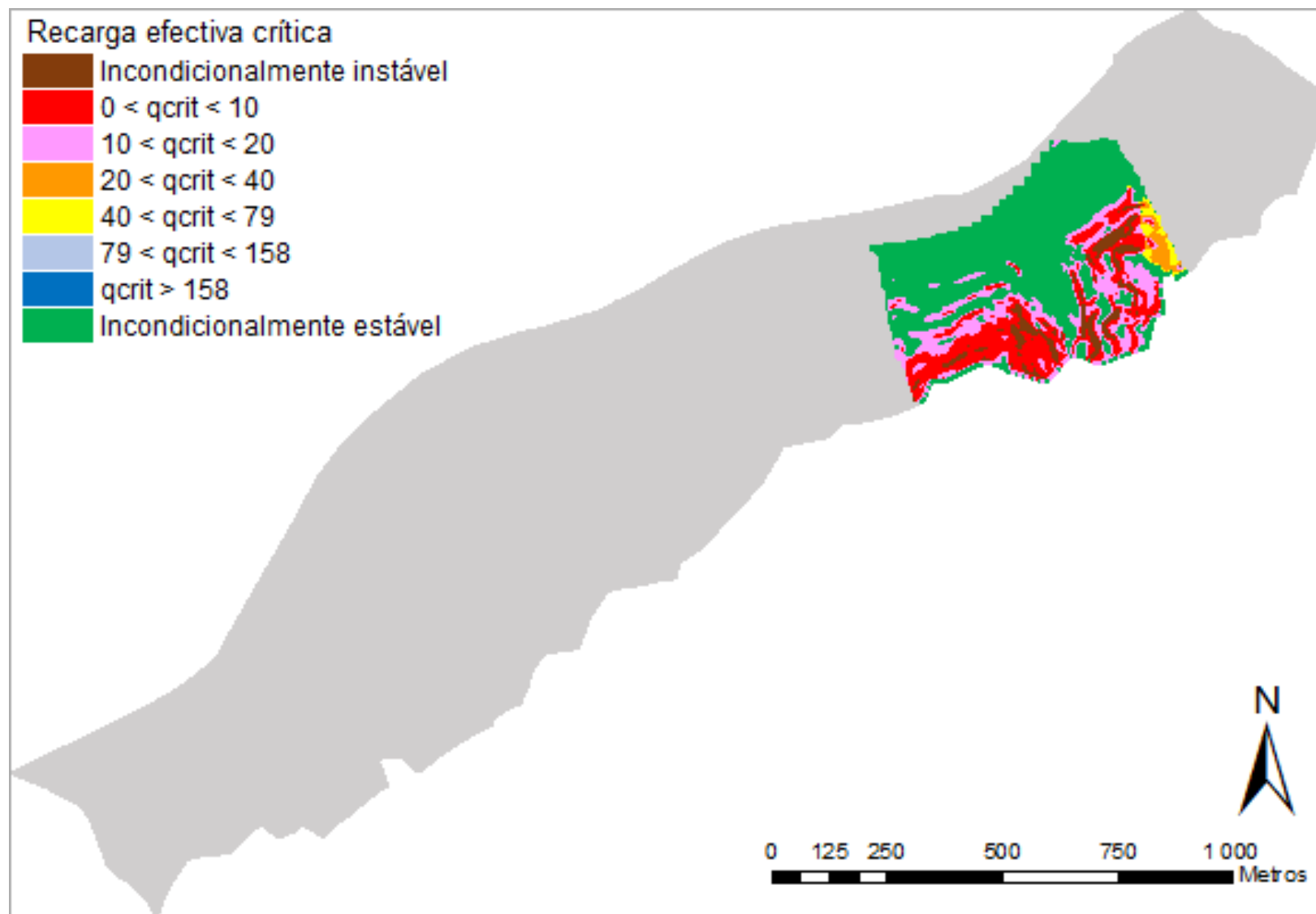


Figura IV.E – Mapa de recarga efectiva crítica ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) no bairro Vale do Forno para o cenário 1.

Tabela IV.E – Valores obtidos para a recarga efectiva crítica (mm.dia⁻¹) no bairro Vale do Forno, para os cenários 1 e 16 a 21.

	Cenário 1		Cenário 16		Cenário 17	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	14 075	5,9	5 125	2,2	66 600	28,1
0 < q _{crit} < 5	15 225	6,4	4 525	1,9	22 550	9,5
5 < q _{crit} < 10	29 375	12,4	13 425	5,7	46 950	19,8
10 < q _{crit} < 15	40 850	17,2	32 125	13,5	900	0,4
15 < q _{crit} < 20	325	0,1	14 850	6,3	850	0,4
20 < q _{crit} < 30	1 275	0,5	150	0,1	1 375	0,6
30 < q _{crit} < 40	2 700	1,1	575	0,2	1 250	0,5
40 < q _{crit} < 79	3 050	1,3	4 450	1,9	0	0,0
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	130 325	54,9	161 950	68,3	96 700	40,8

	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro	m ²	% bairro
Incondicionalmente instável	15 625	6,6	15 625	6,6	31 075	13,1	31 075	13,1
0 < q _{crit} < 5	14 825	6,3	16 625	7,0	17 850	7,5	19 750	8,3
5 < q _{crit} < 10	33 200	14,0	35 625	15,0	36 750	15,5	35 250	14,9
10 < q _{crit} < 15	34 525	14,6	24 875	10,5	24 400	10,3	21 325	9,0
15 < q _{crit} < 20	2 075	0,9	7 575	3,2	2 175	0,9	5 050	2,1
20 < q _{crit} < 30	1 650	0,7	1 775	0,7	1 650	0,7	1 650	0,7
30 < q _{crit} < 40	2 600	1,1	2 225	0,9	2 025	0,9	1 675	0,7
40 < q _{crit} < 79	2 725	1,1	2 900	1,2	1 675	0,7	1 850	0,8
q _{crit} > 79	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Incondicionalmente estável	129 975	54,8	129 975	54,8	119 550	50,4	119 550	50,4

**ANEXO V – Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia-1,
na região de Lisboa, no período de Janeiro de 2001 a Agosto de 2014**

Tabela V.A – Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia⁻¹, de Janeiro de 2001 a Dezembro de 2006 (IDL, 2014a).

	2001		2002		2003		2004		2005		2006	
	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.
Jan	1	30,3	2	20,7	18	38,1	29	85,5	-	-	15	23,6
	5	24,4	23	20,6	20	28,5	-	-	-	-	-	-
Fev	6	35,3	-	-	18	21,3	-	-	-	-	25	22,8
Mar	1	23,7	12	21,7	27	20,7	27	23,4	-	-	4	25,7
	2	20	17	21,7	-	-	31	23,9			17	36
	4	25,6	-	-			-	-	-	-	-	-
	25	20,9										
Abr	-	-	-	-	13	20	-	-	-	-	22	26,3
	-	-	-	-	14	28,8	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	22	29,9	-	-	-	-	-	-
Mai	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	40
Jul	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ago	-	-	-	-	31	27	-	-	-	-	-	-
Set	29	30,8	-	-	-	-	-	-	-	-	21	35,4
Out	5	50,7	8	24,6	2	38	19	21,3	10	26,2	20	42
	28	52,2	-	-	11	21,5	27	24	27	28,9	22	34,3
	-	-			24	20,4	-	-	-	-	24	35
	-	-			31	24,8	-	-	-	-	25	29,9
Nov	-	-	13	21,1	15	29,8	-	-	3	53,2	6	21
	-	-	14	46,8	21	44,9			20	57,9	15	42,9
	-	-	22	20,1	-	-	-	-	-	-	24	73,1
	-	-	24	29,8			27	33,4				
Dez	-	-	9	24,6	-	-	-	-	1	22,9	5	21,7
	-	-	24	43,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela V.B – Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia⁻¹, de Janeiro de 2007 a Dezembro de 2012 (IDL, 2014a).

	2007		2008		2009		2010		2011		2012			
	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.	dia	prec.		
Jan	-	-	1	23,8	1	22,5	3	24,5	5	31,2	-	-		
			3	23,3	22	45,3	4	22,5	-	-				
			-	-	30	32	12	61,2						
					31	36,7	13	29,2						
Fev	-	-	8	30,8	17	26	1	32,2	14	26,4	13	21	-	-
			-	-	18	102,4	-	-	15	79,6	14	48,7		
					20	28,2			16	31,7				
					23	23,3			19	39,7				
Mar	-	-	19	38,1	-	-	3	30,1	28	24,2	30	41,2	-	-
			-	-			5	40,5	-	-				
							6	27,6						
							8	45,3						
Abr	-	-	20	22	17	56,7	-	-	16	21,6	18	23,5	-	-
			18	21,3	-	-	21	42,8						
Mai	-	-	1	24,9	15	21,5	23	36,6	-	-	30	43,2	7	50,1
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Jun	-	-	-	-	28	28,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Jul	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ago	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	30,8	-	-	-
Set	-	-	5	26,2	-	-	-	-	-	-	-	23	30,7	-
Out	-	-	-	-	20	52,5	8	40,9	23	51,3	17	27,5	-	-
					21	30	9	37,4	26	50,8	25	32,9		
					-	-	29	75,7	-	-				
							30	59,7						
Nov	-	-	19	30,9	29	24,9	-	-	14	24,3	2	57,1	16	42,2
			20	57,8	-	-			17	40,5	8	26,5	24	46,4
			-	-					19	25,3	9	47,7	25	57,6
									23	35,2	13	34,5	-	-
									-	-	18	24,5		
Dez	-	-	19	50	13	27,9	23	29,3	5	63,3	-	-	6	91,4
			-	-	27	31,3	28	38,8	20	35,3			14	36,8
					-	-	-	-	22	29,7			-	-
									25	33,9				
									31	28,2				

Tabela V.C - Ocorrências de precipitação diária superior a 20 mm.dia⁻¹, de Janeiro de 2013 a Agosto de 2014 (IDL, 2014a).

	2013		2014	
	dia	prec.	dia	prec.
Jan	19	39,7	4	20,4
	20	27,4	7	26,1
	25	22,9	17	36,2
	-	-	18	25,9
Fev	21	20,3	11	30,2
	22	21,3	-	-
Mar	4	28,9	31	25,4
	17	22,4		
	21	20,5	-	-
	31	59,7		
Abr	-	-	1	22,1
Mai	-	-	-	-
Jun	-	-	-	-
Jul	-	-	-	-
Ago	-	-	-	-
Set	29	22,3		
Out	22	35		
	23	89,5		
	24	50,8		
Nov	-	-		
Dez	24	35,2		