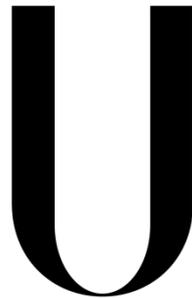


Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

**Avaliação da exposição a movimentos de vertente e definição de áreas
críticas de risco**

Igor Alexandre Ribeiro Ventura Branco

Dissertação orientada
pelo Prof. Doutor Sérgio Manuel Cruz de Oliveira e pela Prof.^a Doutora Raquel
Susana dos Reis Alcântara de Melo

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2022

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



Avaliação da exposição a movimentos de vertente e definição de áreas críticas de risco

Igor Alexandre Ribeiro Ventura Branco

Dissertação orientada
pelo Prof. Doutor Sérgio Manuel Cruz de Oliveira e pela Prof.^a Doutora Raquel
Susana dos Reis Alcântara de Melo

Júri:

Presidente: Professor Doutor Ricardo Alexandre Cardoso Garcia do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

Vogais:

- Professor Doutor Alexandre Oliveira Tavares da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- Professora Doutora Susana da Silva Pereira da Faculdade de Letras da Universidade do Porto
- Professor Doutor Sérgio Manuel Cruz de Oliveira do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

2022

A investigação desenvolvida no âmbito deste trabalho enquadra-se no projeto *BeSafeSlide (BSS): Protótipo de sistema de alerta para movimentos de vertente, de baixo custo, para melhorar a resiliência da comunidade e adaptação às mudanças ambientais* (Ref. PTDC/GES-AMB/30052/2017) e foi financiada por uma Bolsa de Investigação.

Le frane non sono sexy, non catturano la nostra attenzione, non ci fanno girare la testa e il sangue più veloce. Pensate invece agli uragani, ai terremoti e ai vulcani: sono fenomeni terrificanti, terribili, non solo per chi li deve vivere - come purtroppo è successo a tante persone, quest'estate in Centro Italia - ma anche solo a sentirne parlare. Loro sì che attirano l'attenzione, generano curiosità, producono spesso immagini drammatiche e quindi sono telegenici. Una frana no: guardate, è solo un po' di terra, di detrito e del fango. Ma uno dei problemi è che le frane possono anche avvenire in un attimo. I politici e i media ci danno quello che noi cerchiamo. E se prima non troviamo noi sexy certe cose, come la manutenzione del territorio, la prevenzione dei rischi, perché mai dovrebbero trovarla sexy loro? E allora facciamolo, altrimenti altra gente continuerà a morire sotto una frana, o sotto una casa costruita male.

Fausto Guzzetti (2016)

The implications of Tobler's observation are profound. If it were not true, the full range of conditions anywhere on the Earth's surface could in principle be found packed within any small area. There would be no regions of approximately homogeneous conditions to be described by giving attributes to area objects. Topographic surfaces would vary chaotically, with slopes that were everywhere infinite, and the contours of such surfaces would be infinitely dense and contorted. Spatial analysis, and indeed life itself, would be impossible.

Michael J. de Smith, Michael F. Goodchild e Paul A. Longley (2007)

*When I heard the learn'd astronomer;
When the proofs, the figures, were ranged in columns
before me;
When I was shown the charts and diagrams, to add,
divide, and measure them;
When I, sitting, heard the astronomer, where he
lectured with much applause in the lecture-room,
How soon, unaccountable, I became tired and sick;
Till rising and gliding out, I wander'd off by myself,
In the mystical moist night-air, and from time to time,
Look'd up in perfect silence at the stars.*

Walt Whitman (1865)

Solve et coagula.

Agradecimentos

A longa e inclinada vertente que subi ao longo destes últimos meses não foi calcorreada a solo. O caminho ninguém o fez por mim, mas a ajuda de uns e a companhia de outros facilitaram o percurso – e de que maneira! Deste modo, individual ou colectivamente, agradeço a todos os que estiveram, directa ou indirectamente, envolvidos no trajecto.

Ao **Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa**, como instituição de ensino; ao **Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa**, como instituição de acolhimento; ao **Centro de Estudos Sociais da Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra**, como instituição de investigação; à **Fundação para a Ciência e a Tecnologia**, como instituição de financiamento.

Aos meus orientadores, **Professor Sérgio Oliveira e Professora Raquel Melo**, por todo o conhecimento científico e rigor académico, determinantes para todo o processo de investigação. Além disso, pela disponibilidade, paciência, compreensão, crença e garra incomensuráveis que tiveram para comigo. Sem dúvida que, sem a sua orientação, este trabalho nunca terminaria em bem.

Ao **Professor Ricardo Garcia**, por todo o apoio oferecido. O caminho começou com ele. Sem a sua ajuda, nunca teria tido conhecimento da bolsa que financiou o meu trabalho de investigação, do qual esta dissertação resulta.

Aos restantes elementos do projecto BeSafeSlide, **Professores Alexandre Tavares, Carlos Bateira, Eusébio Reis, Fernando Marques, Jorge Rocha, José Luís Zêzere, Marcelo Fragoso, Nuno Marques da Costa, Paulo Morgado, Pedro Santos, Ricardo Trigo e Rui Marques e Professora Susana Pereira**, por me terem ouvido, pelas críticas construtivas e por todas as sugestões que enriqueceram este trabalho.

Aos colegas e às colegas da sala de projectos, **Ana Bonifácio, Ana Hasse, Andreia, Carolina, Diana, Fernando, Francisco, Inês, Margarida, Mariana, Patrícia, Rita, Rodrigue, Sara, Sofia, Teresinha e tantos outros**, por criarem o ambiente ideal de trabalho, ora sério, ora divertido, por respeitarem sempre as necessidades de cada um (à excepção, claro, do conforto térmico) e por me terem ouvido e ajudado sempre que precisei.

Ao **Professor Eduardo Brito-Henriques**, por me ter demonstrado que todas as geografias existentes fazem parte de uma só Geografia!

Aos professores de geografia do ensino básico e secundário que mais me influenciaram, **Professores António Ervideira e João Silva e Professora Lina Nicolau**, por terem contribuído para o alimentar do meu gosto pela geografia.

Aos melhores amigos e amigas que o IGOT me podia ter dado, **Carlos, Nuno, Marta e Andreia**, por todo o companheirismo e escapes ao ambiente académico.

À minha **mãe**, ao meu **pai** e ao meu **irmão**, pela educação que me deram, em constante contacto com a natureza. Ao meu **pai** e à minha **tia**, pelo investimento nos inúmeros atlas e enciclopédias geográficas que me ofereceram em miúdo. Ao meu **avô**, por, em 2010, me ter levado a ver o primeiro deslizamento que observei na minha vida, circunstância que certamente me influenciou a enveredar, mais tarde, nesta área. Infelizmente, por ter falecido no ano passado, não viu este trabalho ser concluído. A todos, pelo apoio moral e financeiro.

À **Marta**, por tudo.

Um “bem-haja!” a vós e deslizem para a felicidade.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | xv |
| Índice de tabelas | xx |
| Resumo | xxiii |
| Abstract..... | xxv |
| | |
| Introdução..... | 1 |
| I <i>Hotspots</i>: estado da arte..... | 7 |
| 1.1. O projeto <i>Hotspots</i> | 7 |
| 1.2. Definição de <i>hotspots</i> nas diferentes componentes do Modelo Concetual de Risco | 10 |
| | |
| II Enquadramento da área de estudo..... | 15 |
| 2.1. Enquadramento geológico | 17 |
| 2.2. Enquadramento geomorfológico | 18 |
| 2.3. Regime da precipitação..... | 20 |
| 2.4. Enquadramento sociodemográfico..... | 21 |
| | |
| III Informação de base e métodos de avaliação | 25 |
| 3.1. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente | 25 |
| 3.1.1. Informação de base..... | 26 |
| 3.1.2. Métodos de avaliação, validação, classificação e análise da suscetibilidade..... | 34 |
| 3.1.2.1. Partição dos inventários de movimentos de vertente..... | 36 |
| 3.1.2.2. Método de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente | 36 |
| 3.1.2.3. Validação dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente | 37 |
| 3.1.2.4. Classificação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente | 38 |
| 3.1.2.5. Análise de concordância espacial dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente | 39 |
| 3.1.3. Hierarquização das sub-bacias | 40 |
| 3.2. Avaliação das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente..... | 43 |

| | |
|--|------------|
| 3.3. Avaliação da exposição a movimentos de vertente | 44 |
| 3.3.1. Avaliação de edifícios e da população exposta a movimentos de vertente | 44 |
| 3.3.1.1. Informação de base | 45 |
| 3.3.1.2. Método de avaliação de edifícios e da população exposta a movimentos de vertente | 47 |
| 3.3.2. Avaliação de Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis e da rede viária exposta a movimentos de vertente | 48 |
| 3.3.2.1. Informação de base | 48 |
| 3.3.2.2. Método de avaliação dos EEEVS e da rede viária exposta a movimentos de vertente | 51 |
| 3.4. Avaliação de áreas críticas de risco | 52 |
| 3.4.1. Informação de base | 52 |
| 3.4.2. Métodos de avaliação das áreas críticas de risco | 54 |
| IV Resultados e Discussão..... | 59 |
| 4.1. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente | 59 |
| 4.1.1. Modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente..... | 59 |
| 4.1.2. Validação dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente. | 65 |
| 4.1.3. Classificação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente. | 67 |
| 4.1.4. Análise da concordância espacial dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente..... | 71 |
| 4.1.5. Hierarquização das sub-bacias | 74 |
| 4.2. Avaliação das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente..... | 75 |
| 4.3. Avaliação da exposição a movimentos de vertente | 77 |
| 4.3.1. Avaliação dos edifícios e da população exposta a movimentos de vertente | 77 |
| 4.3.2. Avaliação dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis e da rede viária exposta a movimentos de vertente | 82 |
| 4.4. Avaliação das áreas críticas de risco | 88 |
| V Conclusão..... | 95 |
| Referências bibliográficas..... | 101 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. – Tendências relativas ao número de ocorrências associadas a instabilidade de vertentes e ao número de mortos ou afetados, para o período 1900-2020. Fonte: EM-DAT – The International Disaster Database (https://public.emdat.be)..... | 2 |
| Figura 2.1. – Localização da bacia do Rio Grande da Pipa (polígono branco) no contexto da região de Lisboa e Vale do Tejo e respetivos municípios (polígonos contornados a preto). . | 15 |
| Figura 2.2. – Delimitação das sub-bacias que constituem a bacia do Rio Grande da Pipa. | 16 |
| Figura 2.3. – Distribuição das unidades geológicas pela bacia do Rio Grande da Pipa. | 18 |
| Figura 2.4. – Altimetria da bacia do Rio Grande da Pipa e toponímia referenciada ao longo do trabalho..... | 19 |
| Figura 2.5. – Precipitação média anual (MAP) registada pela estação meteorológica de São Julião do Tojal (Loures) entre os anos hidrológicos de 1956-1957 e 2008-2009. Linha vermelha: precipitação média anual durante o período compreendido entre os anos hidrológicos de 1956-57 e 2008-09; Círculos verdes: eventos de deslizamentos superficiais; Triângulos vermelhos: eventos de deslizamentos profundos. Fonte: Zêzere et al. (2015). ... | 20 |
| Figura 2.6. – Distribuição do edificado residencial e das áreas urbanas (1995). | 22 |
| Figura 2.7. – Distribuição do edificado residencial e das áreas urbanas (2010). | 22 |
| Figura 2.8. – Distribuição do edificado residencial e das áreas urbanas (2018). | 23 |
| Figura 3 – Síntese do esquema concetual para a definição das áreas críticas de suscetibilidade e de risco a movimentos de vertente. | 25 |
| Figura 3.1. – Metodologia aplicada para a avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente..... | 27 |
| Figura 3.1.1. – Distribuição dos três tipos de deslizamentos selecionados a partir do inventário original de Oliveira (2012) e Oliveira <i>et al.</i> (2015a). | 28 |
| Figura 3.1.2. – Declive (°) das vertentes. D1 = 0 – 5; D2 = 5 – 10; D3 = 10 – 15; D4 = 15 – 20; D5 = 20 – 25; D6 = 25 – 30; D7 = 30 – 40; D8 = > 40..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.1.3. – Orientação das vertentes. E1 = Área plana; E2 = N; E3 = NE; E4 = E; E5 = SE; E6 = S; E7 = SO; E8 = O; E9 = NO. | 30 |
| Figura 3.1.4. – Perfil planiforme das vertentes. C1 = Perfil planiforme côncavo; C2 = Perfil planiforme retilíneo/Área plana; C3 = Perfil planiforme convexo. | 30 |
| Figura 3.1.5. – Topographic Position Index. TPI1 = Fundo de vale; TPI2 = Base de vertente; TPI3 = Vertente côncava ou valeiro; TPI4 = Vertente retilínea, área aplanada, rechã ou portela; TPI5 = Vertente convexa ou colina; TPI6 = Topo; TPI7 = Linha de festo, crista ou cornija. | 31 |
| Figura 3.1.6. – Slope Over Area Ratio. SOAR1 = 0; SOAR2 = 0 – 0,00001; SOAR3 = 0,00001 – 0,0001; SOAR4 = 0,0001 – 0,001; SOAR5 = 0,001 – 0,01; SOAR6 = 0,01 – 0,1; SOAR 7 = > 0,1. | 32 |
| Figura 3.1.7. – Espessura do solo (m). ES1 = 0 – 0,5; ES2 = 0,5 – 1; ES3 = 1 – 1,5; ES4 = 1,5 – 2; ES5 = 2 – 2,5; ES6 = 2,5 – 3; ES7 = 3 – 3,5; ES8 = 3,5 – 4; ES9 = 4 – 4,5; ES10 = > 4,5..... | 33 |
| Figura 3.1.8. – Litologia. Para leitura da legenda, ver Tabela 3.1..... | 34 |
| Figura 3.1.9. – Metodologia aplicada para a hierarquização das sub-bacias..... | 41 |
| Figura 3.2. – Metodologia final aplicada para a avaliação das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente. | 44 |
| Figura 3.3.1. – Processo metodológico aplicado para a avaliação da população exposta a movimentos de vertente. | 46 |
| Figura 3.3.2. – Processo metodológico aplicado para a avaliação de EEEVS e rede viária exposta a diferentes tipos de movimentos de vertente. | 49 |
| Figura 3.4. – Processo metodológico aplicado para a avaliação das áreas críticas de risco. .. | 53 |
| Figura 4.1.1. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais profundos, produzida pelo modelo S1-DRP. | 61 |
| Figura 4.1.2. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais profundos, produzida pelo modelo S2-DRP. | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.1.3. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais profundos, produzida pelo modelo S3-DRP. | 63 |
| Figura 4.1.4. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais superficiais, produzida pelo modelo S1-DRS. | 64 |
| Figura 4.1.5. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos translacionais superficiais, produzida pelo modelo S1-DTS. | 65 |
| Figura 4.1.6. – Curvas de Sucesso (CS) e Curvas de Predição (CP) associadas a cada modelo de suscetibilidade: S1-DRP, S2-DRP, S3-DRP, S1-DRS, S1-DTS..... | 66 |
| Figura 4.1.7. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S1-DRP..... | 68 |
| Figura 4.1.8. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S2-DRP..... | 69 |
| Figura 4.1.9. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S3-DRP..... | 69 |
| Figura 4.1.10. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais superficiais, derivada do modelo S1-DRS. | 70 |
| Figura 4.1.11. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais translacional, derivada do modelo S1-DTS. | 71 |
| Figura 4.1.12. – Concordância espacial entre os mapas de suscetibilidade classificados, derivados dos modelos S1-DRP e S2-DRP..... | 72 |
| Figura 4.1.13. – Concordância espacial entre os mapas de suscetibilidade classificados, derivados dos modelos S1-DRP e S3-DRP..... | 73 |
| Figura 4.1.14. – Concordância espacial entre os mapas de suscetibilidade classificados, derivados dos modelos S2-DRP e S3-DRP..... | 74 |
| Figura 4.1.15. – Hierarquização das sub-bacias de acordo com a suscetibilidade a deslizamentos. | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.2.1. – Distribuição espacial das áreas críticas de suscetibilidade (ACrS) a deslizamentos rotacionais profundos..... | 76 |
| Figura 4.3.1. – Exemplo de dois edifícios residenciais construídos entre 1995 e 2011 sobre um antigo deslizamento rotacional profundo, desencadeado em 1989. | 77 |
| Figura 4.3.2. – Percentagem de edifícios, relativos aos anos de 1995, 2011 e 2018, localizados nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S1-DRP. | 79 |
| Figura 4.3.3. – Percentagem de edifícios com população residente, organizada por estrutura etária, localizados nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S1-DRP..... | 79 |
| Figura 4.3.4. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos. | 80 |
| Figura 4.3.5. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente de idade igual ou inferior a 9 anos, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos..... | 81 |
| Figura 4.3.6. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente de idade igual ou superior a 65 anos, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos..... | 81 |
| Figura 4.3.7. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente de idade igual ou inferior a 9 anos ou de idade igual ou superior a 65 anos, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos. | 82 |
| Figura 4.3.8. – Distribuição espacial dos EEEVS expostos e da rede viária exposta a DRP. | 86 |
| Figura 4.3.9. – Distribuição espacial dos EEEVS expostos e da rede viária exposta a DRS..... | 86 |
| Figura 4.3.10. – Distribuição espacial dos EEEVS expostos e da rede viária exposta a DTS.... | 87 |
| Figura 4.3.11. – Distribuição espacial dos troços críticos..... | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4.1. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente total. | 88 |
| Figura 4.4.2. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente com idade igual ou inferior a 9 anos..... | 89 |
| Figura 4.4.3. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente com idade igual ou superior a 65 anos. | 90 |
| Figura 4.4.4. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos..... | 91 |
| Figura 4.4.5. – Identificação da área definida como Worst Case Scenario. | 92 |

Índice de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1. – Queries solicitadas, resultados obtidos e número de artigos científicos selecionados..... | 10 |
| Tabela 1.2. – Síntese de cada método aplicado pelos autores de cada artigo revisto, que não seguiram a mesma metodologia do projeto Hotspots. ACrP = áreas críticas de perigosidade; ACrE = áreas críticas de exposição; ACrR = áreas críticas de risco. | 11 |
| Tabela 3.1. – Informação utilizada, caracterização e fontes. | 35 |
| Tabela 3.2. – Comparação das classificações atribuídas aos diferentes graus de concordância por Landis e Koch (1977) e por McHugh (2012). | 40 |
| Tabela 3.3. – Informação de base utilizada, características e fonte. | 47 |
| Tabela 3.4. – Informação de base utilizada para a avaliação dos elementos expostos..... | 50 |
| Tabela 3.5. – Classes da base de dados de EEVS atualizada para o ano de 2018 e utilizada para a avaliação de exposição. | 51 |
| Tabela 3.6. – Informação de base utilizada para a avaliação dos edifícios e da população exposta..... | 54 |
| Tabela 4.1. – <i>Scores</i> do Valor Informativo calculados para cada um dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa. A vermelho estão realçados os melhores <i>scores</i> para cada combinação fator de predisposição – modelo de suscetibilidade (> 1); os <i>scores</i> que indicam menos suscetibilidade para cada combinação (< -1) estão realçados a verde..... | 60 |
| Tabela 4.2. – Áreas Abaixo das Curvas de Sucesso e Predição associadas a cada modelo de suscetibilidade: S1-DRP, S2-DRP, S3-DRP, S1-DRS, S1-DTS..... | 66 |
| Tabela 4.3. – Níveis de concordância avaliados para cada par de modelos de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos..... | 72 |
| Tabela 4.4. – Distribuição dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (S1-DRP). | 83 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.5. – Distribuição dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais superficiais (S1-DRS)..... | 83 |
| Tabela 4.6. – Distribuição dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS)... | 84 |
| Tabela 4.7. – Extensão da rede viária nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (S1-DRP). | 85 |
| Tabela 4.8. – Extensão da rede viária nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais superficiais (S1-DRS). | 85 |
| Tabela 4.9. – Extensão da rede viária nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS). | 85 |

Resumo

Os movimentos de vertente são um dos perigos naturais mais frequentes. Provocam, anualmente, milhares de mortos e a perda de milhares de milhões de dólares americanos em prejuízos económicos. A salvaguarda de estruturas, infraestruturas, pessoas e bens requer uma eficaz avaliação e gestão do risco. A avaliação e gestão do risco passam por identificar, estimar o risco, avaliar e implementar soluções que visem reduzir o risco e ponderar os critérios de tolerância ao risco. Uma das formas mais eficazes de reduzir o risco, principalmente o risco sobre a população, é através da implementação de sistemas de alerta. Nesse contexto, a mitigação do risco deve recair, sobretudo, nas áreas onde o risco é maior. Assim, a definição de áreas prioritárias deve ser considerada no âmbito da avaliação e gestão do risco e do desenvolvimento e implementação de um sistema de alerta. Neste sentido, o objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia que permita a definição de áreas críticas de suscetibilidade e de áreas críticas de risco, no contexto de um sistema de alerta para movimentos de vertente. Além da avaliação de áreas críticas e dos temas necessários à sua modelação (suscetibilidade e edifícios/população exposta), também se procedeu à avaliação de outros elementos expostos, como os Elementos Expostos, Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis e a rede viária exposta. As áreas críticas de suscetibilidade delimitam áreas onde se observa, simultaneamente, suscetibilidade elevada ou muito elevada a deslizamentos rotacionais profundos e uma elevada densidade de área deslizada, que se pode traduzir na presença de um deslizamento de grande magnitude ou na presença de vários deslizamentos de menor magnitude. As áreas críticas de risco delimitam áreas onde existe um maior número de edifícios expostos do que o que seria esperado. As primeiras tendem a localizar-se em áreas onde ocorreram alguns dos maiores deslizamentos inventariados e ocupam, principalmente, vertentes talhadas em sequências lito-estratigráficas de margas e argilitos, caracterizadas por declives moderados (5° a 15°) e orientação a Sudeste. As áreas críticas de risco, que consideram a população com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos, ocupam $4,43 \text{ km}^2$, abrangendo 755 edifícios residenciais, onde habitam 2830 pessoas.

Palavras-chave: Movimentos de vertente; Áreas críticas de suscetibilidade; Exposição; Áreas críticas de risco; Região a Norte de Lisboa.

Abstract

Landslides are one of the most frequent natural hazards. They cause thousands of deaths and the loss of billions of US dollars in economic losses every year. The protection of structures, infrastructure, people and property requires effective risk assessment and management. Risk management involves identifying, estimating the risk, evaluating and implementing solutions to reduce the risk and weigh risk tolerance criteria. One of the most effective ways to reduce risk, especially the risk over population, is the implementation of early warning systems. In this context, risk mitigation must fall, mainly, on the areas where the risk is higher. Therefore, the definition of priority areas should be considered within risk management and the development and implementation of an early warning system. In this sense, the main goal of this dissertation is the development of a universal methodology, which allows the definition of susceptibility hotspots and risk hotspots, in the context of a landslide early warning system. In addition to the hotspots assessment and the themes required for their modelling (susceptibility and exposed buildings/population), the assessment of other exposed elements, such as the Exposed, Strategic, Vital and/or Sensitive Elements and the exposed road network, was also carried out. The susceptibility hotspots enclose areas where occurs, simultaneously, high or very high susceptibility to deep-seated rotational slides and a high concentration of landslide area, which may translate into the presence of a landslide of great magnitude or the presence of several landslides of low magnitude. The risk hotspots delimit areas where there is a greater number of exposed buildings than what would be expected. The former tends to be located on some of the largest landslides inventoried and occupy, mainly, slopes carved in lithostratigraphic sequences of marls and mudstones and characterized by moderate slope (5° a 15°) and Southeast slope aspect. The risk hotspots that consider the population below 9 years old or above 65 years old occupy 4,43 km², covering 755 residential buildings, where 2830 people live.

Keywords: Landslides; Susceptibility hotspots; Exposure; Risk hotspots; North of Lisbon region.

I ntrodução

Os movimentos de vertente constituem um dos perigos naturais mais frequentes em todo o mundo (Petley, 2012) e podem ser definidos como um movimento descendente de massa rochosa, solo ou detritos, sobre uma vertente (Cruden, 1991). Provocam, anualmente, milhares de mortos e a perda de milhares de milhões de dólares americanos em prejuízos económicos (Kjekstad e Highland, 2009). Neste sentido, o seu risco pode ser avaliado e gerido, de acordo com as abordagens metodológicas de avaliação e gestão de risco propostas na literatura académica (e.g. Fell *et al.*, 2008).

A Figura 1.1. representa, à escala global, o número de ocorrências¹ e o número de mortos ou afetados por movimentos de vertente, entre os anos de 1900 e 2020, segundo a EM-DAT. De acordo com estes dados, entre 1990 e 2020, os movimentos de vertente representavam, globalmente, 4,9 % de todas as catástrofes naturais consideradas e foram responsáveis por 1,3 % das fatalidades provocadas por perigos naturais.

Apesar das tendências crescentes que se observam na Figura 1.1., Petley (2012) demonstra que, para os anos de 2004 a 2010, a base de dados EM-DAT subestima o número de eventos fatais em ~2000 % e de mortes/afetados em ~430 %. De igual forma, Kirschbaum *et al.* (2015) demonstram que, entre os anos de 2007 e 2013, a base de dados EM-DAT subestima os mesmos indicadores em ~1400 % e ~331 %, respetivamente. Zêzere *et al.* (2014), ao compararem a base de dados DISASTER com a EM-DAT, considerando, para o efeito, os mesmos critérios de definição de ocorrência, também observaram discrepância relativamente ao número total de ocorrências. Dos 58 eventos hidromorfológicos (cheias e movimentos de vertente ocorridos entre 1865 e 2010) registados na base de dados DISASTER e que cumprem os critérios da EM-DAT, apenas 13 constam nesta, não existindo sequer nenhum registo reportado ao período 1900-1966.

¹ A EM-DAT apenas contabiliza ocorrências que tenham provocado um dos seguintes casos: 10 ou mais mortes; 100 ou mais pessoas afetadas; declaração de estado de emergência; pedido de ajuda internacional.

Segundo Froude e Petley (2018), esta incompletude pode ser justificada por os movimentos de vertente serem, de facto, muitas das vezes, desencadeados por outros perigos naturais, levando, conseqüentemente, a que muitos dos danos provocados pela instabilidade de vertentes sejam atribuídos ao fenómeno desencadeante, ou devido a uma perceção generalizada dos movimentos de vertente como um perigo natural secundário.

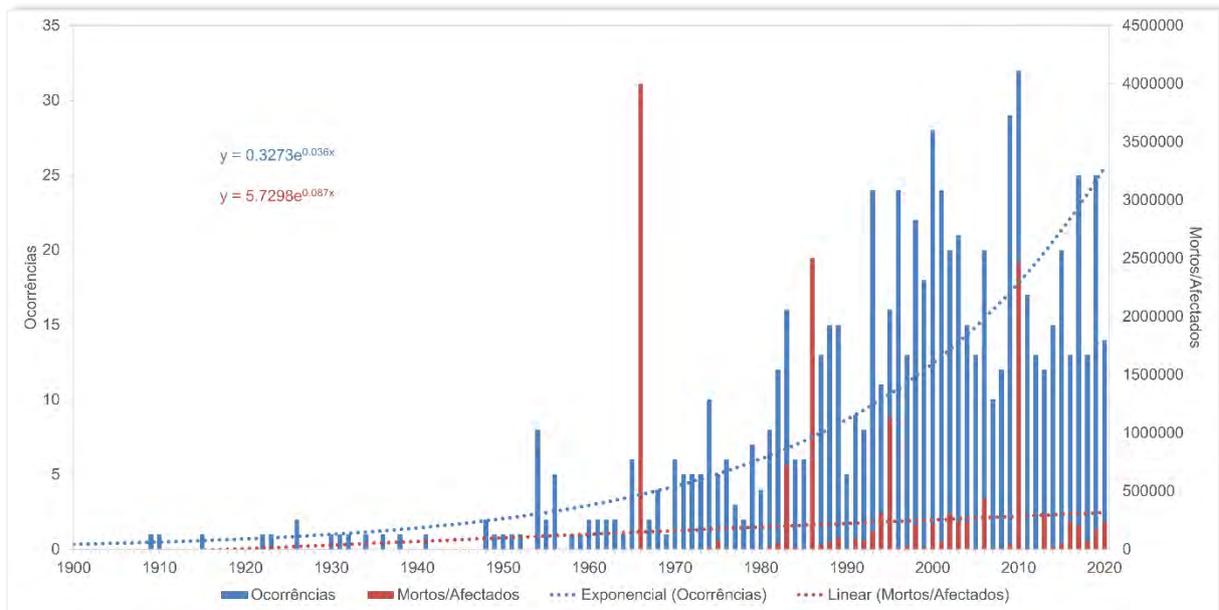


Figura 1.1. – Tendências relativas ao número de ocorrências associadas a instabilidade de vertentes e ao número de mortos ou afetados, para o período 1900-2020. Fonte: EM-DAT – The International Disaster Database (<https://public.emdat.be>).

Na verdade, os movimentos de vertente têm impactos sociais e económicos muito graves e são, certamente, um dos perigos geológicos que mais prejuízos provocam anualmente (Shroder e Davies, 2015). Segundo a EM-DAT, entre 2000 e 2019, os movimentos de vertente provocaram, em média, prejuízos económicos na ordem dos 300 milhões de dólares americanos por ano, estando acima das erupções vulcânicas, por exemplo. Em Portugal, Pereira *et al.* (2017) demonstraram que a mortalidade associada a movimentos de vertente não tem decrescido ao longo do tempo e que a maior parte das fatalidades ocorre em edifícios, apesar dos avanços técnicos e da melhoria das condições estruturais das habitações. Isto ocorre, segundo os autores, entre outros motivos, devido a alterações na exposição da população.

Para evitar a expansão urbana em áreas perigosas é necessário conhecer a predisposição do território à ocorrência de movimentos de vertente e avaliar o risco. Segundo Crozier (2005), a gestão do risco passa por identificar, estimar o risco, avaliar e implementar soluções que visem reduzir o risco e ponderar os critérios de tolerância ao risco. Uma das formas mais eficazes de reduzir o risco associado aos movimentos de vertente, principalmente o risco sobre a população, é através da implementação de sistemas de alerta (Gariano e Guzzetti, 2016). Nesse contexto, a mitigação do risco deve recair, sobretudo, nas áreas onde o risco é maior. Assim, a definição de áreas prioritárias deve ser considerada no âmbito da avaliação e gestão do risco e do desenvolvimento e implementação de um sistema de alerta (Guzzetti *et al.*, 2020).

É neste âmbito que surge o presente trabalho. O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia “universal” (isto é, que possa ser replicada em outras áreas de estudo contextualmente diferentes, do ponto de vista geológico, geomorfológico ou ambiental), que permita a definição de áreas críticas de suscetibilidade e de áreas críticas de risco (vulgarmente conhecidos na literatura científica internacional como *susceptibility/hazard hotspots* e *risk hotspots*) no contexto de um sistema de alerta para movimentos de vertente. De forma a cumprir o objetivo principal, foram definidos, e aplicados à bacia do Rio Grande da Pipa, um conjunto de objetivos secundários condutores do processo de investigação científica:

- i. Avaliação da suscetibilidade, assente no Princípio do Uniformitarismo, na qual se infere a probabilidade espacial de ocorrência de futuros movimentos de vertente, a partir das relações estabelecidas entre a instabilidade histórica na área de estudo e a distribuição espacial de um conjunto de fatores de predisposição;
- ii. Definição das áreas críticas de suscetibilidade, baseadas na sobreposição de áreas instabilizadas e áreas suscetíveis (definidas em i.);
- iii. Avaliação da exposição a movimentos de vertente, considerando a exposição de:
(a) população residente; (b) edifícios residenciais; (c) Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis (EEEVS), de acordo com a definição proposta por Julião *et al.* (2009); (d) rede viária.

- iv. Delimitação das áreas críticas de risco, baseada na aplicação de métodos estatísticos à exposição de população residente e edifícios residenciais.

Este conjunto de objetivos permitirá a corroboração ou refutação das seguintes hipóteses:

- i. A distribuição espacial dos elementos expostos viabiliza a definição de áreas críticas de risco.
- ii. As áreas mais suscetíveis são as mesmas onde se verifica um maior risco.

Segundo o modelo do ICG (*International Centre for Geohazards*), elaborado por Jaedicke *et al.* (2014), a Área Metropolitana de Lisboa e a região a Norte de Lisboa são consideradas um dos *hotspots* europeus no que diz respeito à densidade de população exposta a perigos desencadeados por precipitação, nomeadamente a movimentos de vertente. A área de estudo insere-se na região a Norte de Lisboa, estudada no âmbito da instabilidade de vertentes desde os anos 80 (e.g. Ferreira, 1984; Roxo, 1985; Ferreira *et al.*, 1987; Zêzere, 1988), onde se denota, desde então, favorabilidade para a ocorrência de movimentos de vertente. A própria bacia do Rio Grande da Pipa tem sido igualmente trabalhada desde os anos 90 e de forma continuada ao longo dos últimos 15 anos (e.g. Machado, 1991; Matos, 2008; Benevides, 2009; Pimenta, 2011; Oliveira, 2012; Jesus *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2014; Jesus, 2015; Oliveira *et al.*, 2015a; Oliveira *et al.*, 2015b; Lajas, 2016; Alves, 2018; Jesus *et al.*, 2018; Garcia e Oliveira, 2020; Fonseca, 2020), permitindo problematizar a instabilidade geomorfológica da área de estudo com os seguintes tópicos (Oliveira, 2012):

- i. Morfoestrutura desfavorável, associada a processos de erosão diferencial das rochas, promovendo uma inversão de relevo talhada em materiais margosos e argilosos;
- ii. Ocorrência de deslizamentos lentos, mas de grande dimensão;
- iii. Dispersão urbana para áreas potencialmente perigosas e aceleração da instabilidade por intervenções desajustadas.

Neste sentido, esta dissertação divide-se em 5 capítulos principais: “**I Hotspots: estado da arte**”, “**II Enquadramento da área de estudo**”, “**III Informação de base e métodos de avaliação**”, “**IV Resultados e Discussão**” e “**V Conclusão**”.

No primeiro capítulo, “**I Hotspots: estado da arte**”, pretende-se sintetizar o surgimento das metodologias *Hotspot* no âmbito das ciências dos riscos naturais e demonstrar que métodos e técnicas têm sido utilizados para definir *Hotspots* no contexto das diferentes componentes do Modelo Concetual de Risco.

Em “**II Enquadramento da área de estudo**”, a bacia hidrográfica do Rio Grande da Pipa é apresentada como área de estudo e é feito o seu enquadramento em termos geográficos, geológicos, litológicos, geomorfológicos, do regime da precipitação, e também sociodemográficos.

No terceiro capítulo, “**III Informação de base e métodos de avaliação**”, são explicados todos os procedimentos metodológicos para a definição da suscetibilidade a movimentos de vertente, áreas críticas de suscetibilidade, exposição e áreas críticas de risco a movimentos de vertente. Inclui a contextualização da informação de base utilizada, assim como a descrição dos métodos aplicados para a avaliação, validação, classificação e análise de cada componente.

Os resultados obtidos no capítulo anterior são apresentados e discutidos em “**IV Resultados e Discussão**”, incluindo a avaliação, validação, classificação e análise de suscetibilidade a movimentos de vertente, das áreas críticas de suscetibilidade, da exposição e das áreas críticas de risco a movimentos de vertente.

Em “**V Conclusão**” sintetizam-se os principais resultados deste trabalho, exploram-se as fragilidades encontradas ao longo da investigação, o que poderia ter sido feito para as colmatar e como é que este trabalho pode ser utilizado como base para outros futuros.

I **Hotspots: estado da arte**

O termo *hotspot* ou *hot spot* (ponto quente) é formado pela justaposição das palavras *hot* (adj.) e *spot* (n. m.). No seu sentido literal, qualifica um ponto como quente; contudo, o termo raramente é utilizado para esse fim. Na verdade, trata-se de um termo muito pouco literal, no sentido em que é aplicado nos mais variados contextos para nos referirmos às mais variadas situações. Exemplificando, o *Cambridge Dictionary* considera como um *hotspot* qualquer local de grande interesse comum, nomeadamente aqueles que atraem as pessoas, devido às atividades que oferecem. O *Collins Dictionary* atribui significados mais técnicos ao termo, relacionados com a mecânica automóvel, com a computação, com as telecomunicações, com a medicina, com a genética e com as relações políticas entre Estados. Nas ciências da Terra, o termo *hotspot* é empregue sobretudo a regiões em que a crosta terrestre é afetada por anomalias térmicas no manto superior, levando à ascensão de magma e ocorrência de fenómenos vulcânicos (Francis e Oppenheimer, 2004). Contudo, na última década e meia tem-se assistido a uma crescente aplicação do termo *hotspot* aos riscos naturais. Esta popularização do termo deve-se claramente ao projeto *Identification of Global Natural Disaster Risk Hotspots*, descrito mais à frente, pioneiro na temática e um marco cronológico que divide, no tempo, os trabalhos académicos que não aplicam o termo à avaliação de riscos naturais, daqueles que o aplicam. Em Portugal, não se encontra cunhada nenhuma expressão que se adeque à tradução do termo *hotspot* para a língua portuguesa, pelo que, por razões linguísticas, a partir do subcapítulo 1.2., e ao longo deste trabalho, referir-me-ei aos *hotspots* como áreas críticas.

1.1. O projeto *Hotspots*

O projeto *Hotspots* começou em 2001, quando o *World Bank's Disaster Management Facility* (atualmente *Hazard Management Unit*) iniciou conversações com o *Center for Hazards and Risk Research* na Universidade de Columbia para discutir a possibilidade

de uma análise de riscos naturais à escala global, focada na identificação de *hotspots* (Dilley *et al.*, 2005). O projeto teria o objetivo de criar informações e métodos para identificar prioridades para a redução do risco de catástrofe natural e a tomada de decisões de investimentos para o desenvolvimento (Dilley *et al.*, 2005).

O objetivo global do projeto foi identificar as áreas geográficas com maior potencial de risco a desastres naturais, e desenvolver, para estas, uma metodologia comum para melhorar a identificação do risco e promover a sua gestão através do diálogo entre organizações e indivíduos, operando a várias escalas espaciais, e providenciar informação a possíveis investidores, procurando contribuir, ao mesmo tempo, para o conhecimento atual sobre o risco de desastres naturais à escala global, através (Dilley *et al.*, 2005):

- i. Do desenvolvimento de uma avaliação do risco de desastres naturais à escala global, simples e espacialmente uniforme, através do uso de conjuntos de dados globais, nomeadamente a distribuição espacial da perigosidade, vulnerabilidade e elementos expostos, como principais variáveis independentes;
- ii. Da definição rigorosa e precisa das possíveis perdas sociais e económicas;
- iii. Da identificação das componentes causais do risco, tendo em conta o potencial danoso de cada perigo e a vulnerabilidade dos elementos expostos com potencial para serem afetados;
- iv. Da avaliação multiperigo à escala global, expressa em termos de perdas específicas (mortalidade e perdas económicas) para a população, infraestruturas e atividades económicas em risco;
- v. Da avaliação do risco global através de um número limitado de casos de estudo que permitam a caracterização dos fatores de risco em grande detalhe através de um uso de dados abertos e o envolvimento de *stakeholders* a todas as escalas;
- vi. Da documentação dos métodos de avaliação da perigosidade, vulnerabilidade e risco utilizados ou gerados na análise.

A metodologia desenvolvida baseou-se na identificação de *hotspots* de risco, isto é, áreas ou regiões que apresentam um risco relativamente elevado de impactes adversos

provocados por um ou mais perigos naturais. O termo “adverso” implica que pelo menos algumas consequências maiores provocadas por um evento perigoso são indesejáveis por aqueles que são afetados, por exemplo: mortos, feridos, danos ou perdas de infraestruturas, prejuízos e desemprego (Dilley *et al.*, 2005; Dilley, 2013).

Para a avaliação de *hotspots*, Dilley *et al.* (2005) desenvolveram três índices de risco: um expresso em termos de mortalidade e dois em termos de perda económica (total e em % do PIB), tendo sido posteriormente aplicados a 6 perigos naturais (sismos, erupções vulcânicas, movimentos de vertente, secas, cheias e ciclones). Estes três índices foram determinados a partir de três conjuntos de dados, um primeiro relativo à perigosidade, um segundo relativo à exposição e um terceiro relativo à vulnerabilidade. As fontes de dados de perigosidade dependem do perigo. No caso dos movimentos de vertente foi utilizada cartografia de perigosidade desenvolvida pelo *Norwegian Geotechnical Institute*, em colaboração com outras entidades (Dilley *et al.*, 2005). Quanto à exposição, Dilley *et al.* (2005) optaram pelo *dataset Gridded Population of the World* que contém dados de população residente agregados a uma matriz de 2,5 x 2,5 arco-minuto. Além da população residente, Dilley *et al.* (2005) também recolheram e agregaram, à mesma matriz, informação sobre o PIB, estimada em 2000 pelo *World Bank*. Dada a escala de análise, foram excluídas as células com densidade populacional < 5 hab./km² ou com áreas agrícolas reduzidas ou inexistentes. Nestas condições, quase metade da superfície terrestre foi excluída de análise (45 %), mas a maior parte da população foi tida em consideração (cerca de 6 mil milhões de pessoas). Para representar a vulnerabilidade, Dilley *et al.* (2005) recorreram à mortalidade e às perdas económicas estimadas pela EM-DAT (<https://public.emdat.be>) durante um período de 20 anos (1981-2000).

No caso do risco expresso em termos de mortalidade foram aplicados os valores de mortalidade histórica como fatores de ponderação aos valores de população exposta em cada célula. No caso do risco expresso em termos de perdas económicas (totais e relativas) foram aplicados os valores de perdas económicas históricas como fatores de ponderação aos valores de PIB em cada célula. Para cada um dos índices, os *hotspots* corresponderam às áreas classificadas com os 3 decis mais elevados (Dilley *et al.*, 2005; Dilley, 2013).

Os resultados do projeto, relativamente aos movimentos de vertente, demonstraram que as áreas em risco cobrem, à data, 3,7 milhões de km², onde residem 300 milhões de pessoas, isto é, 5 % da população mundial (Dilley *et al.*, 2005). Quanto aos *hotspots* (áreas classificadas com os 3 decis mais elevados) estes totalizam 820 mil km² com uma população residente estimada em 66 milhões de pessoas (Dilley *et al.*, 2005). Nessas áreas o PIB é mais elevado, mas as áreas agrícolas e o comprimento total de troços rodoviários e ferroviários estão dentro da média global (Dilley *et al.*, 2005).

No âmbito do projeto foram lançados vários casos de estudo para diferentes perigos, nomeadamente a movimentos de vertente, cujos resultados foram publicados por Nadim *et al.* (2006a; 2006b), Nadim e Kjekstad (2009) e Nadim *et al.* (2013).

1.2. Definição de hotspots nas diferentes componentes do Modelo Concetual de Risco

As revisões bibliográficas são os alicerces de um estado da arte sólido, mas para chegar à bibliografia pretendida é fundamental passar primeiro por uma pesquisa rigorosa. Para esse efeito foram introduzidas, no Google Académico – um motor de busca de literatura científica, de acesso livre e com uma cobertura de cerca de 100 milhões de documentos – uma série de *queries*, indicadas na Tabela 1.1..

Tabela 1.1. – *Queries solicitadas, resultados obtidos e número de artigos científicos selecionados.*

| | <i>Query</i> | Data de pesquisa (DD-MM-AAAA) | Documentos encontrados | Artigos selecionados | Artigos selecionados sobre movimentos de vertente |
|------------------------|---|-------------------------------|------------------------|----------------------|---|
| Suscetibilidade | hazard OR hazards "susceptibility hotspots" | 05-12-2020 | 3 | 0 | 0 |
| Perigosidade | hazard OR hazards "hazard hotspots" | 05-12-2020 | 221 | 1 | 0 |
| Exposição | hazard OR hazards "exposure hotspots" | 06-12-2020 | 76 | 4 | 1 |
| Risco | hazard OR hazards "risk hotspots" | 06-12-2020 | 882 | 20 | 5 |

Apesar das especificações, o motor de busca encontrou centenas de documentos; no entanto, nem todos interessavam para este trabalho. Primeiro, foram selecionados, manualmente, apenas artigos publicados por revistas com revisão por pares. Depois, foram excluídos todos aqueles que não abordavam perigos naturais ou ambientais. E desses, selecionaram-se apenas aqueles cuja metodologia ou método apresentado poderia ser replicado a movimentos de vertente. No final sobraram 22 artigos

científicos, dos quais 6 têm como objeto de estudo a instabilidade de vertentes, mencionados doravante.

A maior parte dos autores tem seguido a metodologia do projeto *Hotspots* (e.g. Jaedicke *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2015; Asare-Kyei *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Christie *et al.*, 2018; Hazarika *et al.*, 2018; Jacobs *et al.*, 2018; Li e Zha, 2020), em que as áreas críticas, sejam elas relativas à suscetibilidade, à perigosidade, à exposição ou ao risco, são definidas pelos quantitativos mais elevados de cada índice. Mesmo assim, também se encontram trabalhos acadêmicos em que a definição de áreas críticas passa pela elaboração de metodologias, métodos ou técnicas mais inovadoras, como é o caso, por exemplo, da estatística inferencial (Tabela 1.2.).

Tabela 1.2. – Síntese de cada método aplicado pelos autores de cada artigo revisto, que não seguiram a mesma metodologia do projeto *Hotspots*. ACrP = áreas críticas de perigosidade; ACrE = áreas críticas de exposição; ACrR = áreas críticas de risco.

| | Componente avaliada | Perigo | Método utilizado |
|------------------------------------|---------------------|------------------------|--|
| Huang <i>et al.</i> (2018) | ACrP | Cheias | Densidade de Kernel das ocorrências |
| Jalayer <i>et al.</i> (2014) | ACrE | Cheias | <i>Spatial overlay</i> (suscetibilidade + elementos) |
| Promper e Glade (2016) | ACrE | Movimentos de vertente | <i>Spatial overlay</i> (suscetibilidade + elementos) |
| De Risi <i>et al.</i> (2018) | ACrE | Cheias | <i>Spatial overlay</i> (suscetibilidade + elementos) |
| De Risi <i>et al.</i> (2020) | ACrE | Cheias | <i>Spatial overlay</i> (suscetibilidade + elementos) |
| Hu <i>et al.</i> (2017) | ACrR | Ondas de calor | Índice de Risco sem definição das ACrR |
| Röthlisberger <i>et al.</i> (2017) | ACrR | Cheias | Aplicação de estatística Gi* |
| Biçer e Ercanoglu (2020) | ACrR | Movimentos de vertente | Índice de Risco sem definição das ACrR |
| Leis e Kienberger (2020) | ACrR | Cheias | Aplicação de estatística Gi* |
| Sajjad <i>et al.</i> (2020a) | ACrR | Inundações costeiras | Aplicação de estatística Gi* |
| Sajjad <i>et al.</i> (2020b) | ACrR | Inundações costeiras | Aplicação de estatística Gi* |
| Sajjad <i>et al.</i> (2020c) | ACrR | Inundações costeiras | Aplicação de estatística Gi* |
| Zhao <i>et al.</i> (2020) | ACrR | Multi-perigos | Aplicação de estatística Gi* |
| Abante (2021) | ACrR | Multi-perigos | Aplicação de estatística Gi* |

Atualmente, a maior parte dos poucos trabalhos científicos que existem sobre áreas críticas de perigosidade (ACrP), do ponto de vista metodológico, não conseguem trazer mais valias para o estudo dos movimentos de vertente, por não serem replicáveis. Huang *et al.* (2018) são a exceção à regra. Com a investigação, os autores procuraram identificar alterações nos padrões espaciais e temporais das ACrP a inundações urbanas em Guangzhou, na China (Huang *et al.*, 2018). A densidade de Kernel foi o método utilizado e este foi aplicado a um conjunto de pontos representativos de ocorrências e eventos de inundações urbanas entre 2009 e 2015

(Huang *et al.*, 2018). Huang *et al.* (2018) obtiveram no total 8 *outputs* cartográficos, isto é, 8 superfícies de ACrP: 1 para cada ano e 1 para toda a janela temporal. Com este método, a definição de áreas críticas permite perceber se as medidas de mitigação implementadas ao longo dos anos têm reduzido o número de ocorrências ou, se não for o caso, onde estas deverão ser aplicadas. Este artigo demonstra o potencial que a densidade de Kernel tem e o tipo de resultados que consegue gerar, podendo muito bem ser aplicada a movimentos de vertente. Contudo, e Huang *et al.* (2018) referem este aspeto, é um método que necessita de calibração, visto que os resultados gerados dependem do raio de pesquisa selecionado e, conseqüentemente, da área analisada.

Tal como acontece no caso das ACrP, as áreas críticas de exposição (ACrE) também são, ainda, pouco exploradas no âmbito da investigação científica. Promper e Glade (2016) propõem a aplicação de um método que avalie todos os elementos expostos a movimentos de vertente num único documento cartográfico, isto é, um *multilayer-exposure map*. O método consiste no cruzamento de cartografia classificada de suscetibilidade com mapas binários de cada um dos elementos, sendo que o resultado será um único documento cartográfico, em que cada classe representa uma combinação, o que, por sua vez, significa que cada célula contém informação sobre a classe de suscetibilidade em que se encontra, se tem ou não elementos expostos, e, se sim, quantos e quais (Promper e Glade, 2016). Com estes resultados, facilmente se identificam as ACrE. É um método relativamente simples e que não exige muitos dados geográficos, ainda assim, não está livre de possíveis problemas. A utilização da cartografia de suscetibilidade adiciona sempre incerteza, porque tem um erro associado à modelação. Promper e Glade (2016) introduzem *buffers* em redor de todos os elementos para ter em conta a propagação média das áreas deslizadas, considerando que a área do *buffer* também é área exposta. Esta metodologia, por si só, é discutível, mas a incerteza reside principalmente na largura utilizada para a geração dos *buffers*: Promper e Glade (2016) utilizam, em redor de cada elemento exposto, o comprimento médio de todos os movimentos de vertente que ocorreram na área de estudo (50 metros), mas o ideal seria experimentar valores diferentes. Jalayer *et al.* (2014) e De Risi *et al.* (2018, 2020) também identificaram ACrE a inundações urbanas, sobrepondo as áreas mais suscetíveis, determinadas com base no limiar de um Índice

de Humidade Topográfica, aos elementos expostos, nomeadamente áreas urbanas e população residente.

Quanto às áreas críticas de risco (ACrR), encontramos mais autores a trabalhar nesta temática do que nas duas anteriores. O objetivo de Röthlisberger *et al.* (2017) era perceber como é que resultados diferentes, por via da utilização de diferentes unidades de análise, influenciavam diferentes estratégias de mitigação de risco. A metodologia passou por, primeiro, agregar três índices referentes aos elementos expostos (número de edifícios, área dos edifícios e número de residentes) a dois tipos de unidades espaciais (municípios e células). Depois, para cada uma das 6 combinações, foram determinados dois indicadores – densidades (e.g. número de edifícios expostos por unidade de área) e rácios (e.g. percentagem de edifícios expostos). Por fim, todas as 12 combinações foram submetidas a testes estatísticos G_i^* de Getis e Ord, tendo sido consideradas 5 distâncias fixas para as combinações agregadas a unidades matriciais e 3 distâncias fixas para as combinações agregadas a unidades administrativas, sempre considerando níveis de confiança de 95 %. Os autores conseguem demonstrar que, para um determinado elemento exposto, indicadores ou unidades espaciais de análise diferentes vão dar resultados diferentes e modificar completamente as decisões políticas na tomada de medidas de mitigação de risco. Contudo, os autores confirmam que a melhor unidade para aplicação de medidas de proteção contra cheias são aquelas maiores que um único município. Por isso mesmo, faz sentido dar uma maior importância a clusters de valores elevados de risco do que a valores elevados de risco, mas dispersos (Röthlisberger *et al.*, 2017). Leis e Kienberger (2020), Sajjad *et al.* (2020a, b, c), Zhao *et al.* (2020) avaliaram áreas críticas de risco (ACrR) recorrendo aos Índices Global e Local de Moran I e à estatística G_i^* de Getis e Ord. Abante (2021) faz uso da grelha hexagonal na identificação de ACrR, sob o pretexto de esta ser a representação mais próxima do espaço geográfico. Ainda, Hu *et al.* (2017) e Biçer & Ercanoğlu (2020) indicam a avaliação de ACrR como o objetivo principal do trabalho, mas, no final, não indicam explicitamente onde estas se localizam, apoiando-se na capacidade interpretativa do leitor.

II Enquadramento da área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Rio Grande da Pipa (Figura 2.1.), localizada a cerca de 30 km a Norte da cidade de Lisboa (Oliveira, 2012).



Figura 2.1. – Localização da bacia do Rio Grande da Pipa (polígono branco) no contexto da região de Lisboa e Vale do Tejo e respetivos municípios (polígonos contornados a preto).

A bacia do Rio Grande da Pipa encontra-se confinada a Norte pela bacia do Rio Alenquer, a Sul pela bacia do Rio Trancão, a Oeste pela bacia do Rio Sizandro e a Este

pela planície aluvial do Rio Tejo, do qual o Rio Grande da Pipa é tributário, está delimitada por um perímetro de 57,3 km e ocupa uma área de 110,6 km², podendo ser classificada, segundo Singh (1992), como uma pequena bacia hidrográfica (< 250 km²). Cerca de metade (45,5 %) da bacia do Rio Grande da Pipa é controlada administrativamente pelo município de Arruda dos Vinhos; a restante área está afeta aos municípios de Alenquer (22,5 %), Sobral de Monte Agraço (18,3 %), Vila Franca de Xira (13,6 %) e Torres Vedras (0,1 %).

Considerando as delimitações propostas por Oliveira (2012), que têm como limite jusante o estrangulamento existente a nordeste de Cadafais e a norte de Quintas, antes de se entrar na planície aluvial do Rio Tejo, a bacia do Rio Grande da Pipa é constituída por 30 sub-bacias hidrográficas (Figura 2.2.).

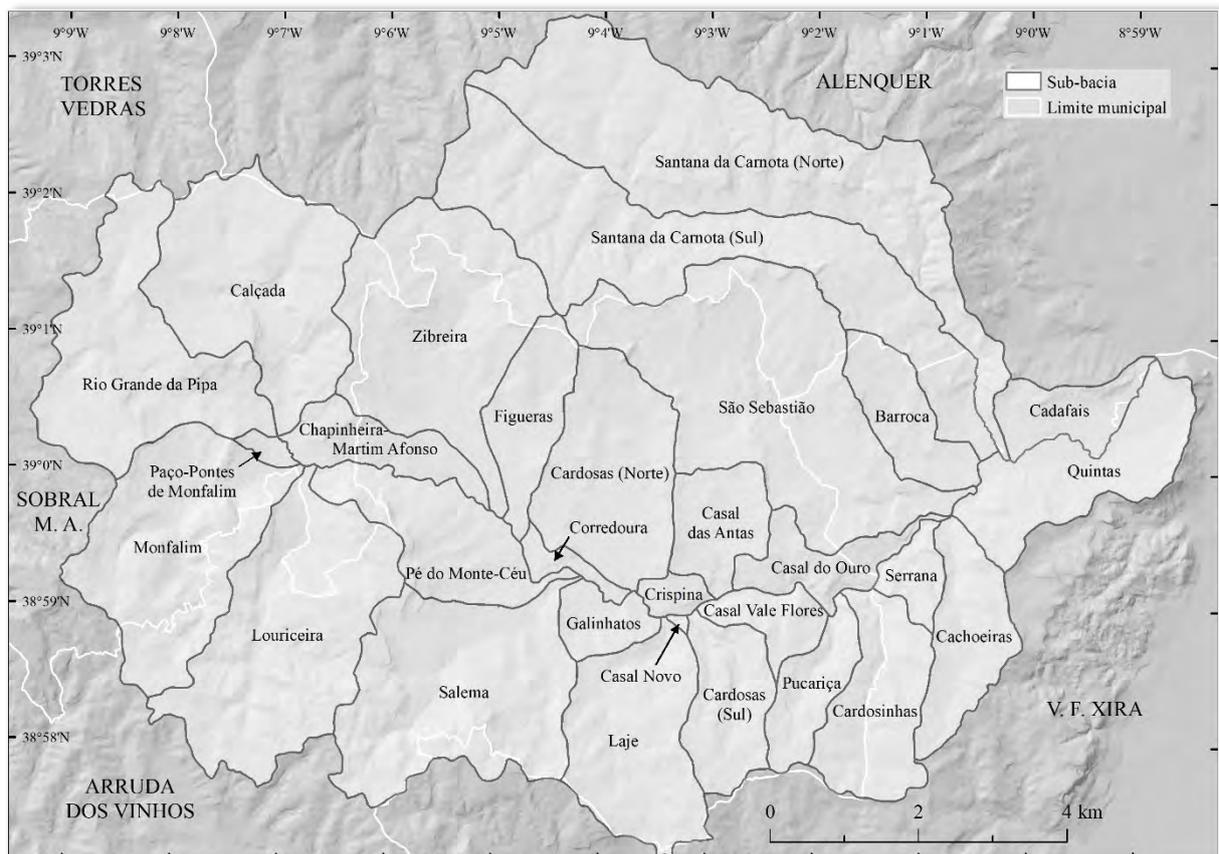


Figura 2.2. – Delimitação das sub-bacias que constituem a bacia do Rio Grande da Pipa.

Santana da Carnota, localizada no setor Norte, é a sub-bacia de maior dimensão, totalizando 20 km². Para efeitos de análise estatística, por esta sub-bacia deter uma área total muito desfasada da área média de todas as sub-bacias (4 km²), foi dividida,

pelo fundo do vale da Ribeira de Santana da Carnota, em duas sub-bacias de menor dimensão: Santana da Carnota (Norte) (11 km²) e Santana da Carnota (Sul) (9 km²). Na área de estudo, a sub-bacia com menor dimensão (Casal Novo) ocupa 0,05 km².

2.1. Enquadramento geológico

A bacia do Rio Grande da Pipa está integrada na unidade morfoestrutural da Orla Mesocenoica Ocidental. Observam-se, sobretudo, formações sedimentares do Jurássico Superior (ca. 96 %), representadas principalmente por quatro unidades geológicas: a Formação de Abadia, a Formação de Amaral, a Formação de Sobral e a Formação de Arranhó (Figura 2.3.). A Formação de Abadia (Kimeridgiano Inferior e Médio) consiste num espesso complexo argiloso (ca. 800 m de espessura), com intercalações de argilas, margas, siltitos e arenitos, estes últimos podendo ser mais ou menos desenvolvidos (Oliveira, 2012). Esta aflora numa vasta área com cerca de 13 km de comprimento por 10 km de largura e situa-se entre Sobral de Monte Agraço, Batalha, Carvalha, Arruda dos Vinhos, Vila Franca de Xira, Castanheira, Refugidos e Carnota (Figura 2.4.). Ocupa quase 58 % da área total da bacia, correspondendo não só à formação mais antiga a aflorar na bacia, como também é a que tem mais expressão territorial (Zbyszewski e Assunção, 1965). A Formação de Amaral (Kimeridgiano Superior), composta por massas calcárias de 30 a 80 m de espessura (Kullberg *et al.*, 2006), por vezes separadas por margas ou por margo-calcários, aflora numa área de contacto com a Formação de Abadia, ocupando 16 % da área da bacia. É facilmente observável, sob a forma de cornijas com cerca de 5 a 10 m de altura, no topo das vertentes que flanqueiam a depressão de Arruda (Zbyszewski e Assunção, 1965; Oliveira, 2012). A Formação de Sobral (Kimeridgiano Superior e Titoniano), que ocupa 16 % da área da bacia, caracteriza-se por uma sequência siliclástica, com espessuras que variam entre os 65 e os 130 m, constituída por margas siltosas ou arenosas, argilas siltosas e arenosas, e arenitos oolíticos mais ou menos grosseiros (Zbyszewski e Assunção, 1965). A Formação de Arranhó (Titoniano Inferior), com uma espessura a variar entre 150 e 250 m, decrescendo para Norte e para Oeste até ao seu desaparecimento, é constituída essencialmente por calcários e margas muito

fossilíferos (Kullberg *et al.*, 2006) e aflora em 6 % da área da bacia. As restantes unidades geológicas são pouco expressivas.

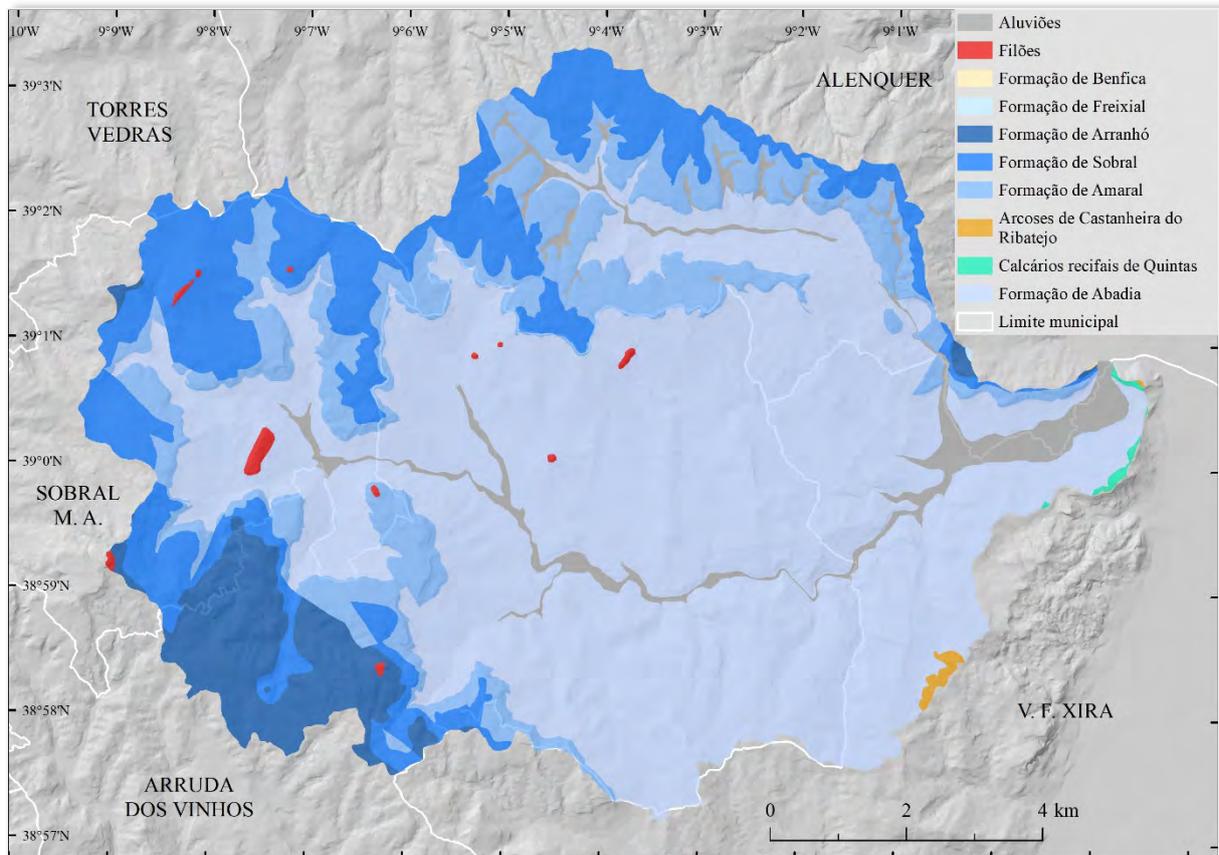


Figura 2.3. – Distribuição das unidades geológicas pela bacia do Rio Grande da Pipa.

A bacia do Rio Grande da Pipa enquadra-se numa região que sofreu várias deformações sinclinais e anticlinais durante o Mesozoico, o que deu origem a um empolamento tectónico, neste caso, correspondente a um anticlinal de grande raio de curvatura, cujo eixo está centrado em Arruda dos Vinhos (Zbyszewski e Assunção, 1965; Oliveira, 2012). A par desta deformação verificam-se ainda outros acidentes que definem o padrão de fracturação que afeta a região: um primeiro conjunto de fraturas, com disposição NE-SO, preenchidas em muitos casos por filões magmáticos; e um segundo conjunto de fraturas, mais recentes, com disposição NO-SE (Oliveira, 2012).

2.2. Enquadramento geomorfológico

Na bacia do Rio Grande da Pipa, a altitude varia entre os 10 m, na desembocadura da

bacia, e os 441 m nas proximidades de Alqueidão, no setor montante central da bacia, perfazendo uma amplitude altimétrica de 431 m, uma altitude média de 168 m e uma altura média de 155 m. Na bacia, o declive varia entre 0° e 65°, e apresenta um valor médio de 8°. A variação altitudinal geral é decrescente no sentido direcional do escoamento, ou seja, de Oeste para Este (Figura 2.4.). As formas de relevo da bacia do Rio Grande da Pipa são controladas principalmente pela alternância de materiais com diferente resistência à erosão, plasticidade e permeabilidade (Oliveira, 2012). O anticlinal de Arruda dos Vinhos é afetado por processos de erosão diferencial, promovendo uma inversão de relevo, a formação de uma depressão (de Arruda) e o afloramento de rochas mais antigas e mais brandas no centro da bacia (Formação de Abadia), deixando-as expostas aos agentes erosivos (Garcia e Oliveira, 2020).

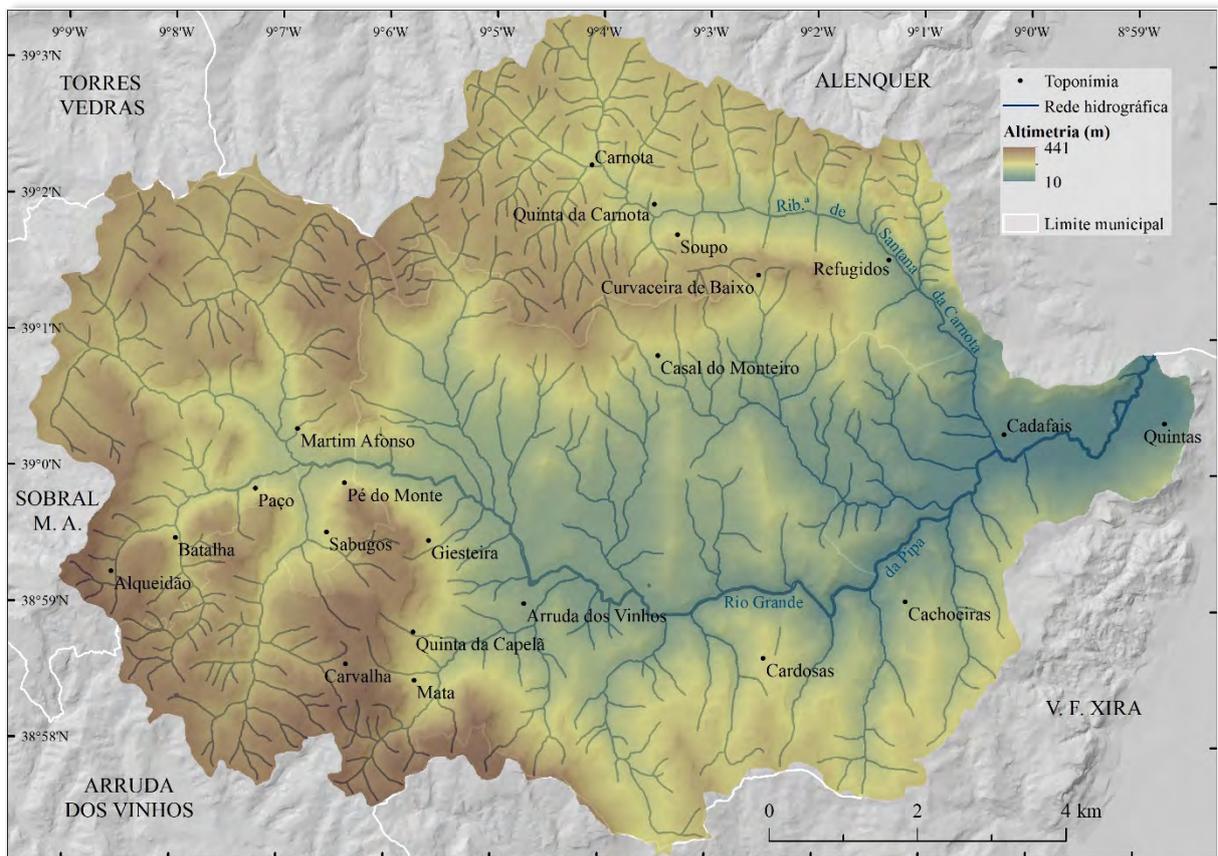


Figura 2.4. – Altimetria da bacia do Rio Grande da Pipa e toponímia referenciada ao longo do trabalho.

Com o esvaziamento, por erosão, da zona central do anticlinal, observa-se hoje uma inversão de relevo, com as rochas mais antigas a aflorar no centro da depressão que caracteriza a bacia do Rio Grande da Pipa. Este contexto, permitiu estabelecer uma

disposição das formações mais recentes em estrutura monoclinal nas margens da depressão de Arruda, caracterizada por reversos suaves e anversos mais abruptos (Machado, 1991). É nestes anversos que se desenvolvem as vertentes mais extensas da bacia, encimadas por cornijas calcárias que marcam a transição entre a Formação calcária de Amaral e a Formação margosa de Abadia (Oliveira, 2012).

2.3. Regime da precipitação

Na região a Norte de Lisboa, onde a área de estudo se insere, o regime da precipitação é tipicamente mediterrânico e caracteriza-se por uma grande variabilidade intra-anual, em que as precipitações ocorrem sobretudo entre os meses de outubro e março, seguidas de grandes períodos estivais (Zêzere *et al.*, 2005).

A estação meteorológica de São Julião do Tojal, considerada por Oliveira *et al.* (2014) como a mais adequada para o ajuste de limiares empíricos de precipitação para a ocorrência de movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa, regista uma precipitação média anual próxima dos 750 mm (Figura 2.5.) de acordo com os dados de Zêzere *et al.* (2015).

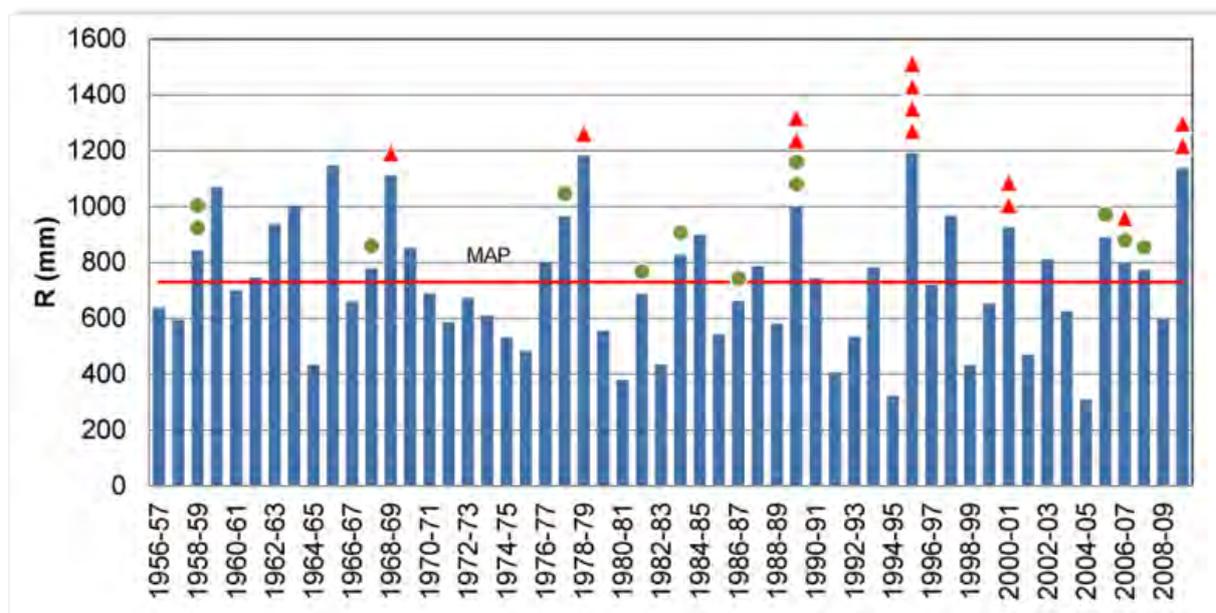


Figura 2.5. – Precipitação média anual (MAP) registada pela estação meteorológica de São Julião do Tojal (Loures) entre os anos hidrológicos de 1956-1957 e 2008-2009. Linha vermelha: precipitação média anual durante o período compreendido entre os anos hidrológicos de 1956-57 e 2008-09; Círculos verdes: eventos de

deslizamentos superficiais; Triângulos vermelhos: eventos de deslizamentos profundos. Fonte: Zêzere et al. (2015).

2.4. Enquadramento sociodemográfico

O município de Arruda dos Vinhos, ao qual cerca de metade da área da bacia do Rio Grande da Pipa está afeta, tem visto a sua população residente aumentar (35 %) ao longo dos últimos 20 anos. Segundo o Instituto Nacional de Estatística, em 2001, residiam 10 350 pessoas no município. Até 2021, esse número aumentou para 13 992 habitantes. A população residente é representada em maior número pela população em idade ativa; no entanto, observa-se uma tendência para a sua diminuição. Em 2001, 68 % da população residente encontrava-se em idade ativa; em 2021, 64 %. Este decréscimo é, de certa forma, compensado por uma população residente cada vez mais envelhecida, que, em 2021, correspondia a 19 % da população total, mais 2 % do que em 2001. Os jovens, entre 2001 e 2021, aumentaram 1 % (de 15 % para 16 %). Estas proporções resultam num rácio de 118 idosos para cada 100 jovens, em 2021. Os agregados são, na sua maioria, compostos por 3 ou mais pessoas (variação de 52 % para 48 %, entre 2001 e 2021). Os agregados unipessoais são os menos numerosos; ainda assim, têm vindo a aumentar (variação de 15 % para 22 %, entre 2001 e 2021), compensando a diminuição dos primeiros.

Em 1995, a bacia hidrográfica do Rio Grande da Pipa englobava 6045 edifícios residenciais (Figura 2.6.). Até 2011, esse número aumentou para 7320, o que reflete a construção de 1283 habitações e a demolição de 8 (Figura 2.7.). Até 2018, foram construídos mais 220 e demolidos 11, traduzindo-se num número total de 7529 (Figura 2.8.). Relativamente à área urbana, esta aumentou de 3,4 % (4,5 km²), em 1995, para 5,7 % (5,7 km²), em 2011. Em 2018, esse valor ainda aumentou para 6 % (7,9 km²). A maior parte dos edifícios inserem-se nestas áreas urbanas e este valor tem vindo a aumentar. Em 1995, 2443 edifícios (40,4 %) estavam fora das áreas urbanas. Em 2011 e 2018, esse valor diminuiu consecutivamente, primeiro para 2629 (35,9 %), e posteriormente para 2259 (30 %). Estes dados foram utilizados neste trabalho, como se pode verificar no subcapítulo 3.3..

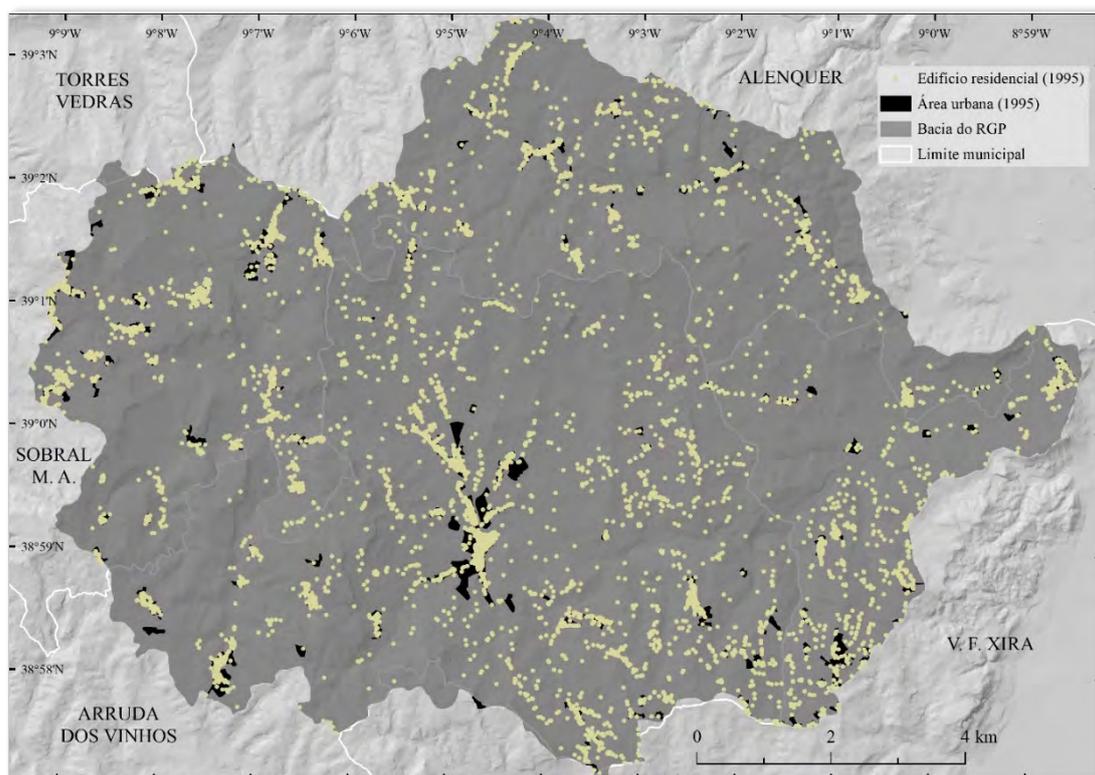


Figura 2.6. – Distribuição do edificado residencial e das áreas urbanas (1995).

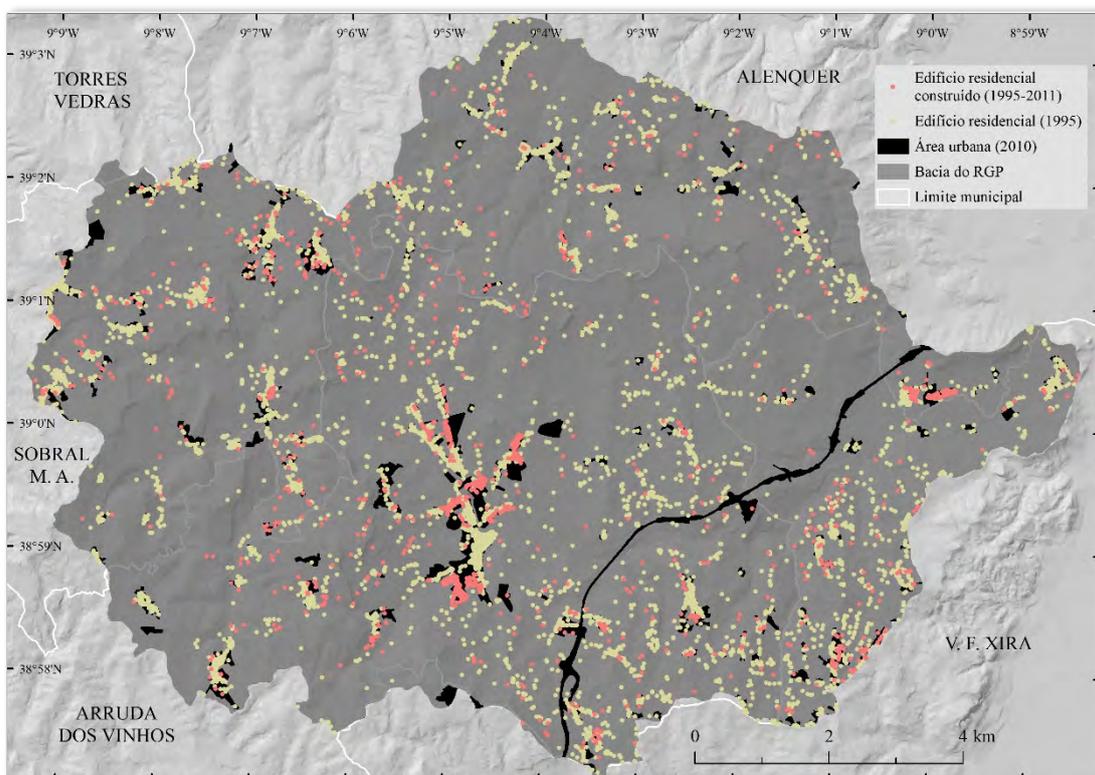


Figura 2.7. – Distribuição do edificado residencial e das áreas urbanas (2010).

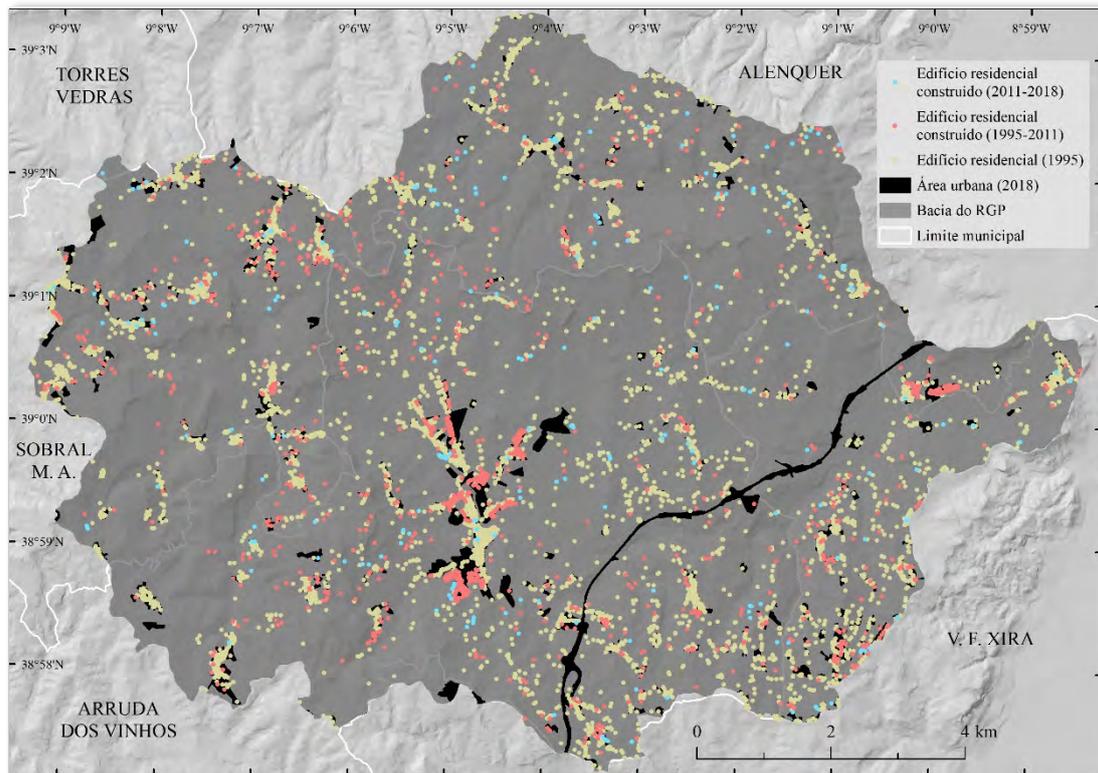


Figura 2.8. – Distribuição do edificado residencial e das áreas urbanas (2018).

III Informação de base e métodos de avaliação

Este capítulo tem como objetivo a descrição das metodologias aplicadas durante a investigação para (i) a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, (ii) a definição das áreas críticas de suscetibilidade, (iii) a avaliação da exposição a movimentos de vertente, e (iv) a definição das áreas críticas de risco. No âmbito deste trabalho, estas quatro componentes serão abordadas neste capítulo em quatro subcapítulos distintos. Por sua vez, em cada subcapítulo, será referido tanto a informação de base utilizada em cada abordagem, como os métodos que foram experimentados ou utilizados para a obtenção dos resultados. Os procedimentos efetuados encontram-se sintetizados na Figura 3.

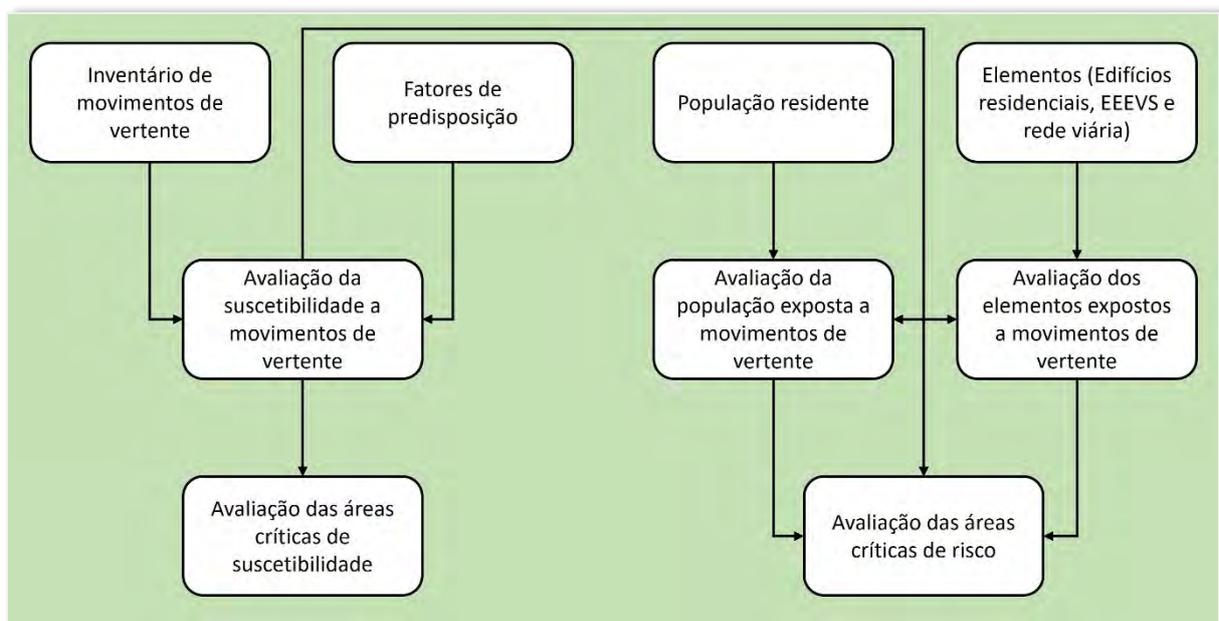


Figura 3 – Síntese do esquema conceitual para a definição das áreas críticas de suscetibilidade e de risco a movimentos de vertente.

3.1. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente

O processo de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, que se encontra

sintetizado na Figura 3.1., compreende 6 etapas, descritas nos subcapítulos que se seguem: organização da base de dados, partição dos inventários, avaliação, validação, classificação e análise.

3.1.1. Informação de base

A informação geográfica de base utilizada na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na área em estudo consiste num inventário histórico de movimentos de vertente e num conjunto de fatores de predisposição assumidos como explicativos das manifestações de instabilidade inventariadas na bacia hidrográfica do Rio Grande da Pipa.

O inventário de movimentos de vertente provém de Oliveira (2012), com atualizações de Oliveira *et al.* (2015a). Trata-se de um inventário multitemporal, mas com alguma incerteza associada à datação das manifestações de instabilidade, sendo que dois terços dos movimentos de vertente estão associados, não a uma data específica, mas a um determinado período. Este é variável, e foi definido em função das fontes de informação que permitiram identificar o movimento de vertente, por exemplo, datas de fotografias aéreas ou ortofotomapas consultados. Do inventário original, foram selecionados 633 deslizamentos rotacionais profundos (profundidade da superfície de rutura > 1,5 m), 342 deslizamentos rotacionais superficiais (profundidade da superfície de rutura até 1,5 m) e 177 deslizamentos translacionais superficiais (profundidade da superfície de rutura até 1,5 m), vetorizados sob a forma de polígonos (Figura 3.1.1.), nos quais se consideraram as áreas de depleção e de acumulação. Estes três tipos de movimentos de vertente foram selecionados por ocorrerem em vertentes naturais e por serem os que ocorrem com mais frequência na área de estudo e na região a Norte de Lisboa (Zêzere, 2020). Os primeiros cobrem uma área total de 6,8 km², o que corresponde, em termos relativos, a cerca de 6 % da área da bacia do Rio Grande da Pipa. Têm uma área média de 10.681 m², uma área máxima de 262.194 m² e uma área mínima de 46 m². Os deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais ocupam, em conjunto, menos de 1 % da área de estudo. Os rotacionais superficiais cobrem 0,3 km² da bacia do Rio Grande da Pipa.

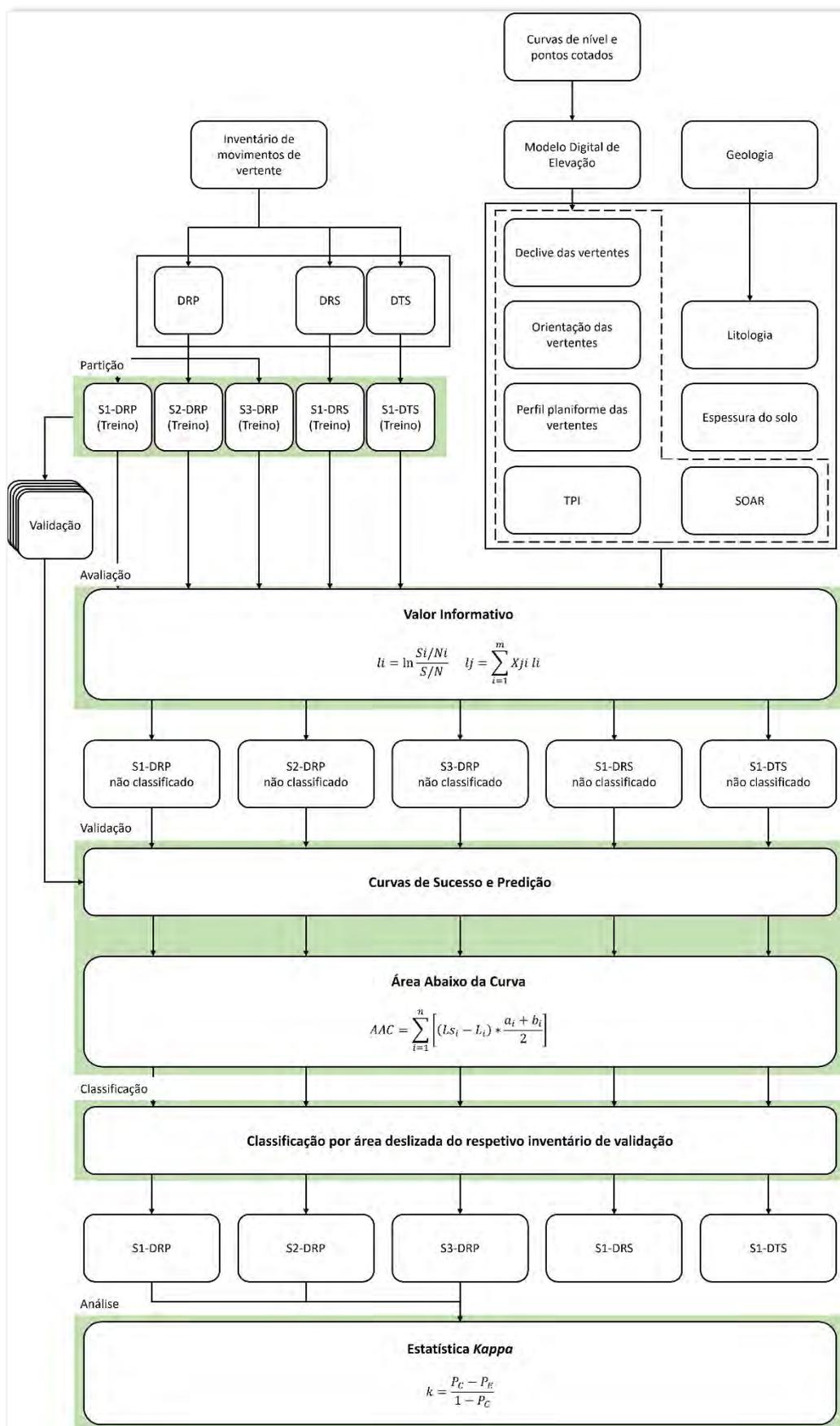


Figura 3.1. – Metodologia aplicada para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

Têm uma área média de 928 m², sendo que o maior e o menor têm uma área de 13.461 m² e 29 m², respectivamente. Os translacionais superficiais distribuem-se sobre 0,05 km² da bacia do Rio Grande da Pipa e têm uma área média de 265 m², sendo que o maior e o menor deslizamento ocupam 1957 m² e 12 m², de modo respectivo.

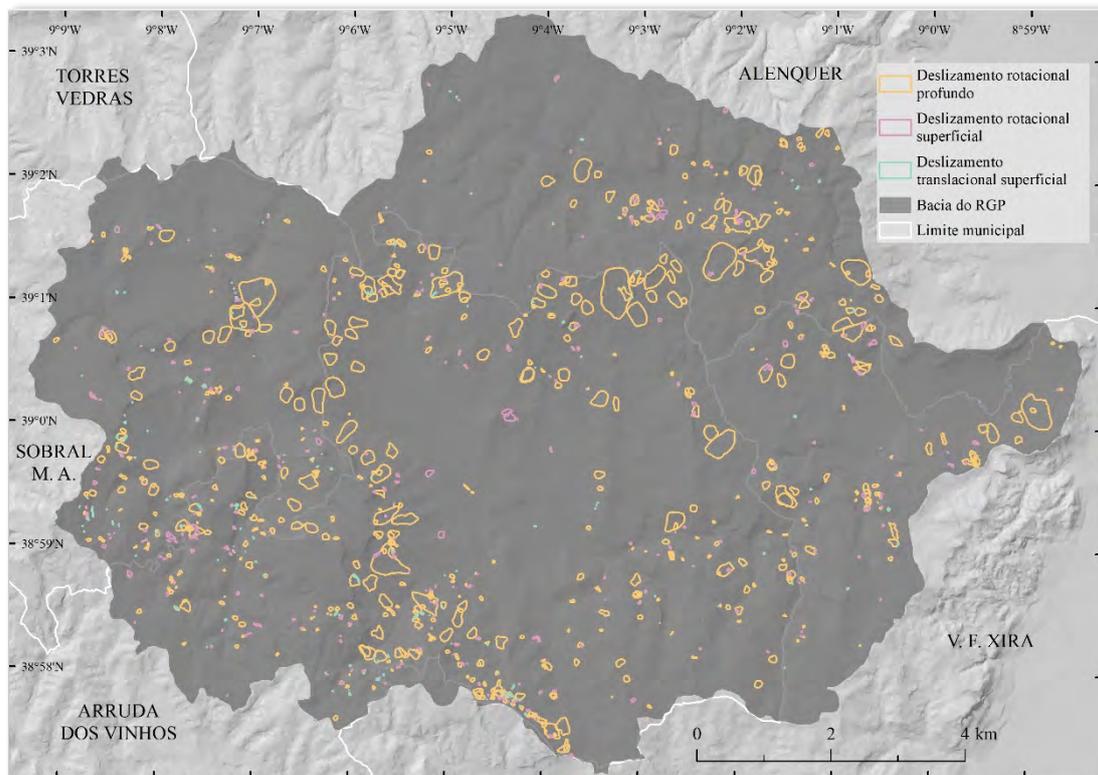


Figura 3.1.1. – Distribuição dos três tipos de deslizamentos selecionadas a partir do inventário original de Oliveira (2012) e Oliveira et al. (2015a).

As variáveis independentes assumidas como fatores de predisposição para a ocorrência de deslizamentos consistem no declive (Figura 3.1.2), na orientação (Figura 3.1.3.) e no perfil planiforme das vertentes (Figura 3.1.4.), no *Topographic Position Index* (TPI, Figura 3.1.5.), *Slope Over Area Ratio* (SOAR, Figura 3.1.6.), na espessura do solo (Figura 3.1.7.) e na litologia (Figuras 3.1.8.). Estes fatores são considerados internacionalmente (Corominas *et al.*, 2014) como importantes para a ocorrência de deslizamentos.

O declive é determinado pela inclinação de uma vertente em relação a um plano horizontal. Trata-se de uma das variáveis mais importantes e a mais utilizada na avaliação da suscetibilidade a deslizamentos (Reichenbach *et al.*, 2018), visto que afeta diretamente as tensões tangenciais, a infiltração e a pressão intersticial provocada pela

água nos solos (Bromhead, 1999; Craig, 2004). Sem considerar a interferência de outros fatores, quanto maior o declive, maior terá de ser o atrito para resistir à força na direção tangencial ao plano.

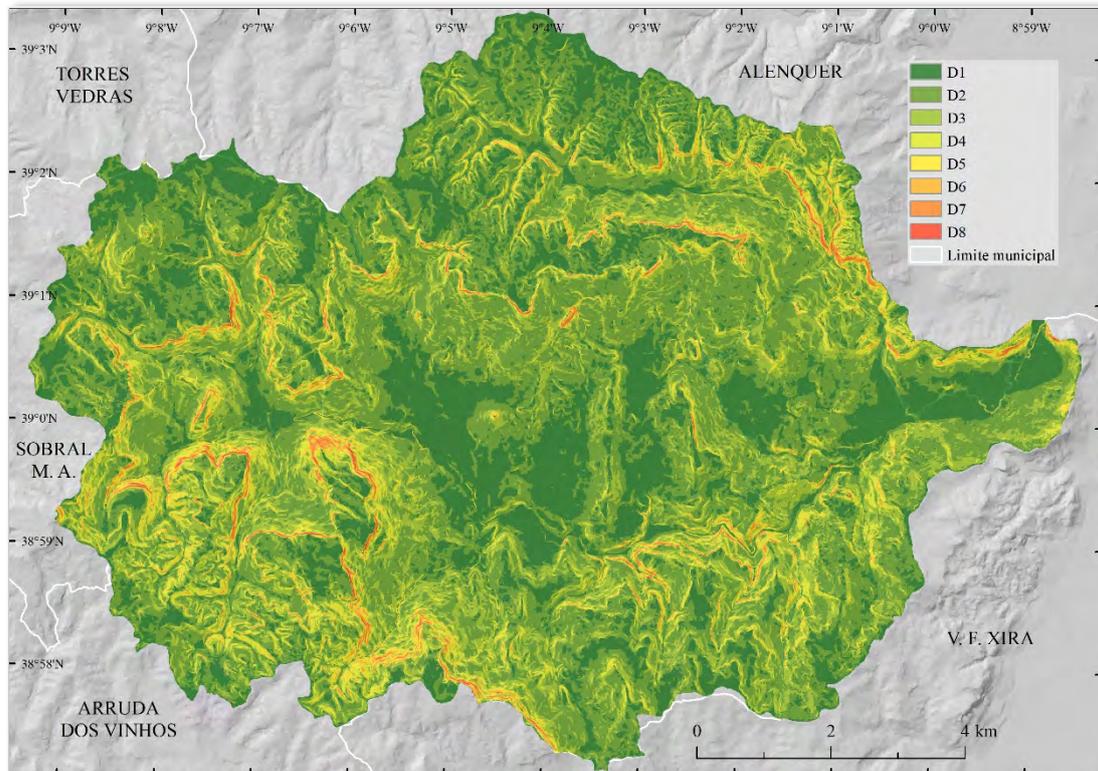


Figura 3.1.2. – Declive (°) das vertentes. D1 = 0 – 5; D2 = 5 – 10; D3 = 10 – 15; D4 = 15 – 20; D5 = 20 – 25; D6 = 25 – 30; D7 = 30 – 40; D8 = > 40.

A orientação (ou exposição) das vertentes é definida como a direção cardinal do plano de uma vertente, sendo medida em graus (0° a 360°) a partir de Norte e no sentido dos ponteiros do relógio (Bui *et al.*, 2011). A exposição das vertentes é, tal como o declive, uma das informações derivadas de dados altimétricos mais aplicadas na modelação de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos (e.g. Dai e Lee, 2002; Reis *et al.*, 2003; Ayalew *et al.*, 2004; Zêzere *et al.*, 2008; Chauhan *et al.*, 2010; Bui *et al.*, 2011; Constantin *et al.*, 2011). As vertentes mais expostas à incidência de determinados fatores que controlam as condições climáticas locais (e.g. a exposição solar e eólica, que influenciam a temperatura e a humidade do ar e do solo) são, normalmente, as mais desprovidas de vegetação densa (Dai e Lee, 2002; Chauhan *et al.*, 2010, Bui *et al.*, 2011). Como a vegetação funciona como uma proteção natural à erosão, as vertentes mais despidas são as mais suscetíveis à instabilidade.

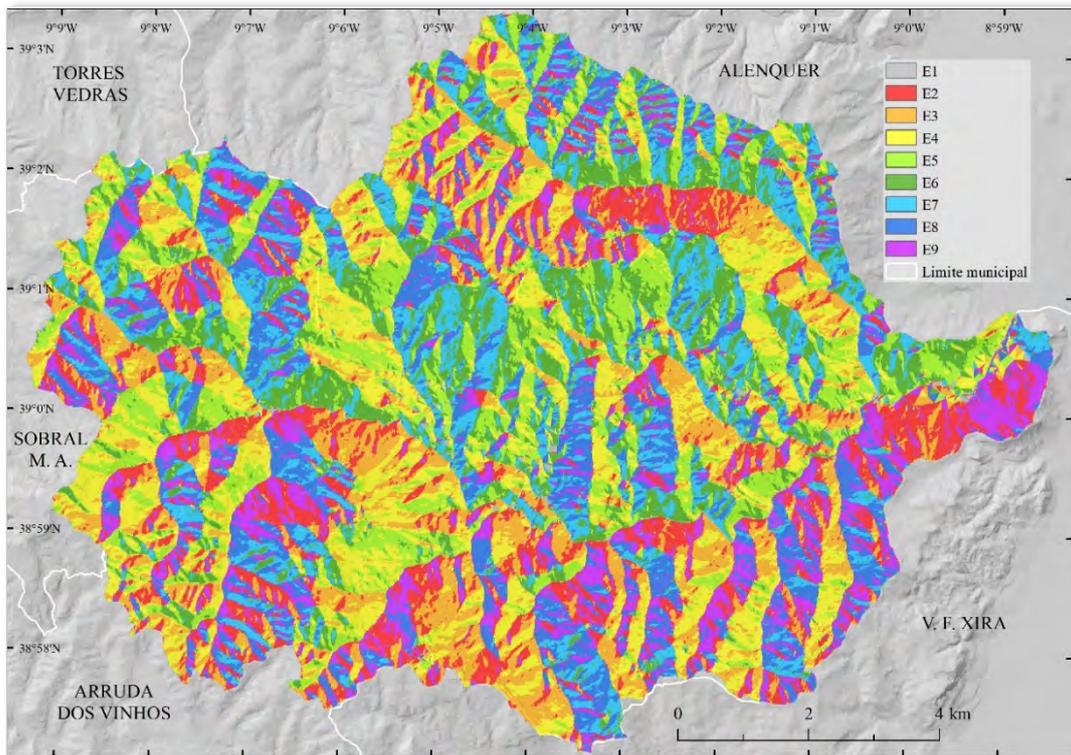


Figura 3.1.3. – Orientação das vertentes. E1 = Área plana; E2 = N; E3 = NE; E4 = E; E5 = SE; E6 = S; E7 = SO; E8 = O; E9 = NO.

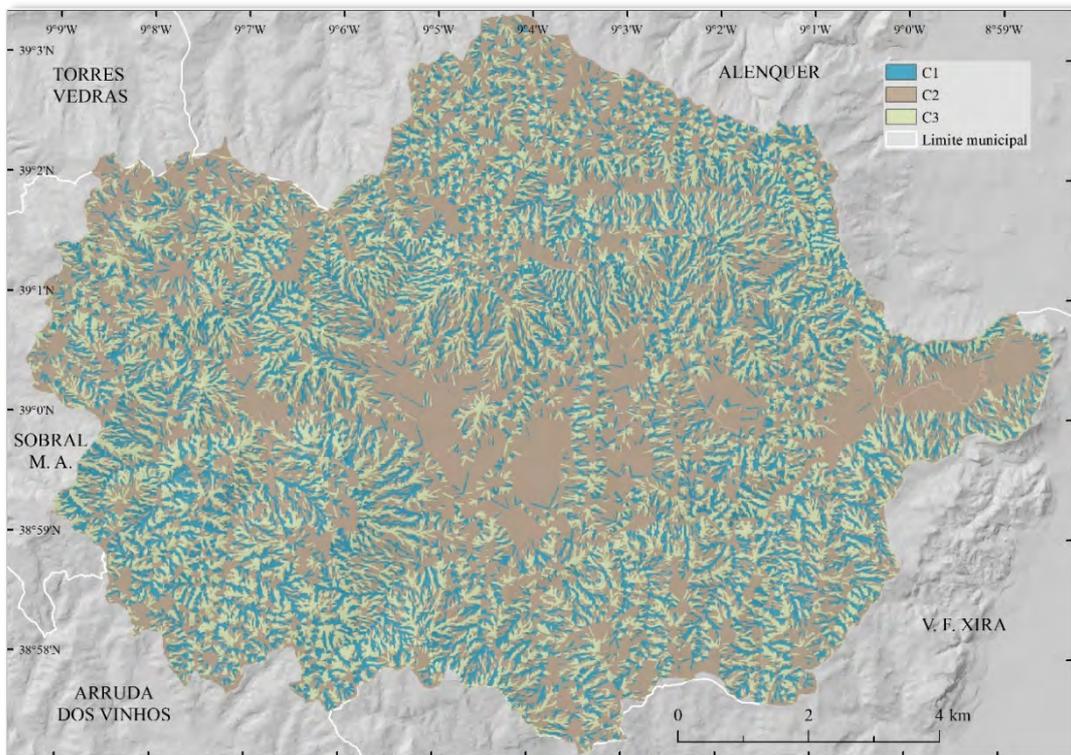


Figura 3.1.4. – Perfil planiforme das vertentes. C1 = Perfil planiforme côncavo; C2 = Perfil planiforme retilíneo/Área plana; C3 = Perfil planiforme convexo.

Por norma, no Hemisfério Norte, as vertentes com menos densidade de vegetação são aquelas orientadas a Sul (Chauhan *et al.*, 2010, Bui *et al.*, 2011). No entanto, outros autores recorrem à variável como um *proxy* da morfoestrutura (e.g. Zêzere *et al.*, 2008). Alguns autores têm colocado em causa a capacidade preditiva da exposição das vertentes enquanto fator de predisposição a deslizamentos, considerando-a relevante apenas em casos que se verifiquem ocorrências superficiais e em solos argilosos (Capitani *et al.*, 2013).

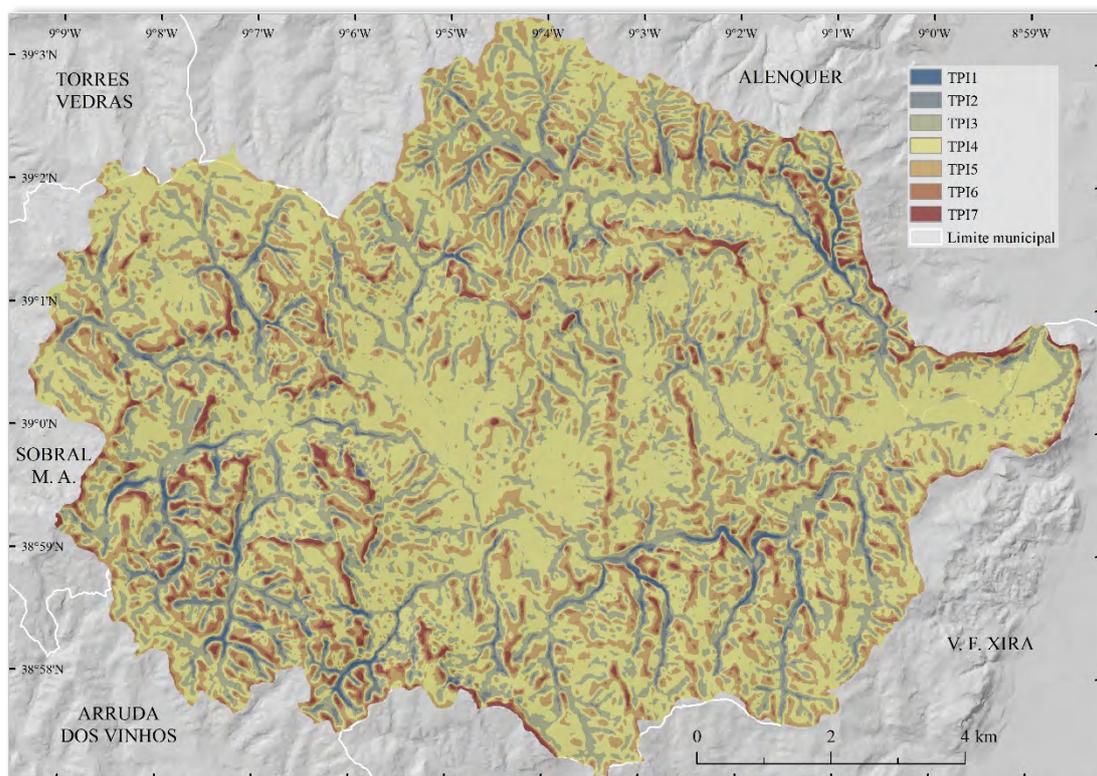


Figura 3.1.5. – *Topographic Position Index*. TPI1 = Fundo de vale; TPI2 = Base de vertente; TPI3 = Vertente côncava ou valeiro; TPI4 = Vertente retilínea, área aplanada, rechã ou portela; TPI5 = Vertente convexa ou colina; TPI6 = Topo; TPI7 = Linha de fecho, crista ou cornija.

O perfil planiforme das vertentes corresponde à forma da vertente numa orientação perpendicular à da curvatura longitudinal, expressando as alterações da exposição da vertente (Garcia, 2012) e a condução do escoamento superficial (Ohlmacher, 2007).

O *Topographic Position Index* (TPI) ou Índice de Posição Topográfica, proposto por Guisan *et al.* (1999) e mais tarde desenvolvido por Weiss (2001) e Jenness (2006), define a posição relativa de uma célula ao longo de um gradiente topográfico e possibilita a obtenção de uma classificação baseada em formas de relevo (Guisan *et al.*,

1999; Jenness, 2006). O modelo compara a altitude de cada célula, de um Modelo Digital de Elevação, à altitude média de uma vizinhança pré-definida em redor de cada célula (Weiss, 2001). Se uma célula estiver a uma posição topográfica significativamente mais elevada em relação à média da vizinhança (i.e., um topo), ser-lhe-á atribuído um valor positivo, que será maior quanto maior for o gradiente; caso a célula se situe numa posição topográfica inferior às das células vizinhas (i.e., um fundo de vale), é-lhe atribuído um valor negativo. Células com valor igual ou próximo a zero situam-se em áreas planas ou declivosas, respetivamente (Weiss, 2001; Jenness, 2006). É expetável que a instabilidade incida sobre áreas em que o TPI equivale a valores que variem entre zero e $-x$.

O *Slope Over Area Ratio* (SOAR) é uma variável *proxy* que reflete, quanto maior for o seu valor, o potencial de presença e retenção de água nos solos (Zêzere *et al.*, 2017; Meneses *et al.*, 2019).

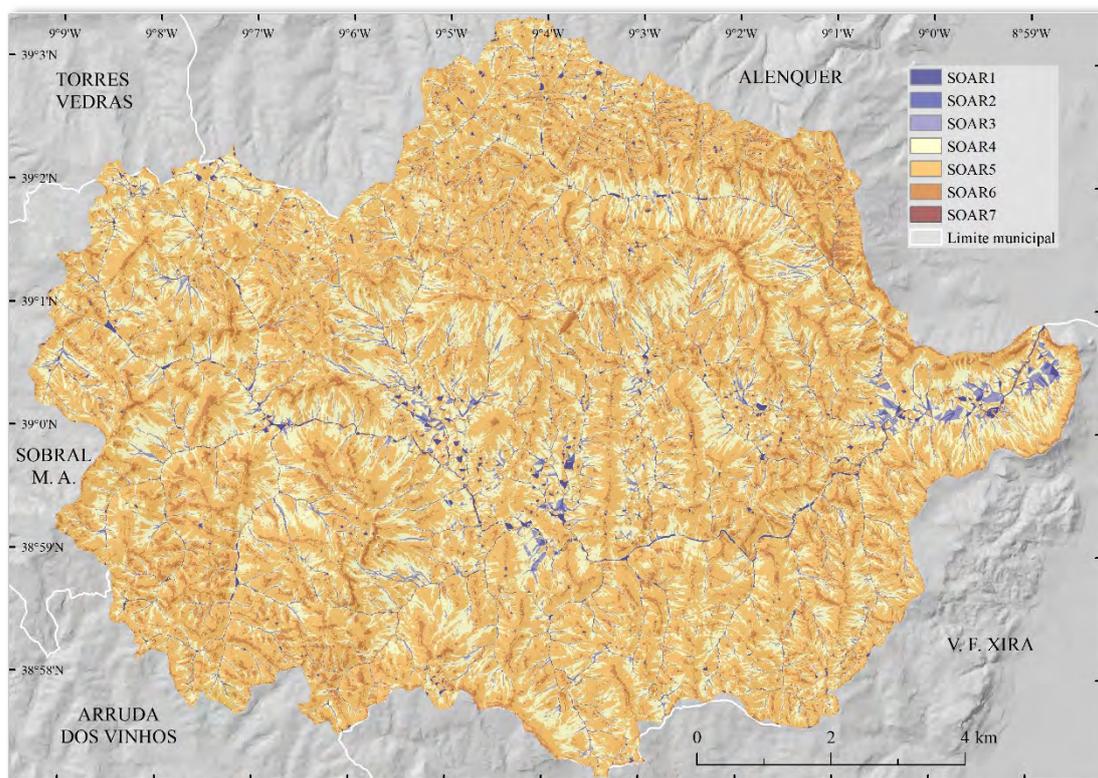


Figura 3.1.6. – *Slope Over Area Ratio*. SOAR1 = 0; SOAR2 = 0 – 0,00001; SOAR3 = 0,00001 – 0,0001; SOAR4 = 0,0001 – 0,001; SOAR5 = 0,001 – 0,01; SOAR6 = 0,01 – 0,1; SOAR 7 = > 0,1.

A espessura do solo influencia o potencial de disponibilidade hídrica das vertentes e o seu comportamento hidrológico, afetando diretamente a estabilidade ou instabilidade geomorfológica (Dietrich *et al.*, 1995; Van Asch *et al.*, 1999; Catani *et al.*, 2010).

A litologia, a seguir ao declive, é a variável independente mais utilizada nos modelos de avaliação de suscetibilidade a deslizamentos (Reichenbach *et al.*, 2018). Muitos autores consideram-na importante para o processo (e.g. Carrara *et al.*, 1991; Dai e Lee, 2002; Van Westen *et al.*, 2003; Lee e Talib, 2005; Chauhan *et al.*, 2010; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2010; Bui *et al.*, 2011; Conforti *et al.*, 2012; Henriques *et al.*, 2015), pois a porosidade, a dureza, a compactação e a resistência de cada tipo de rocha influenciam a estabilidade ou instabilidade de uma vertente (Dai e Lee, 2002; Chauhan *et al.*, 2010; Bui *et al.*, 2011).

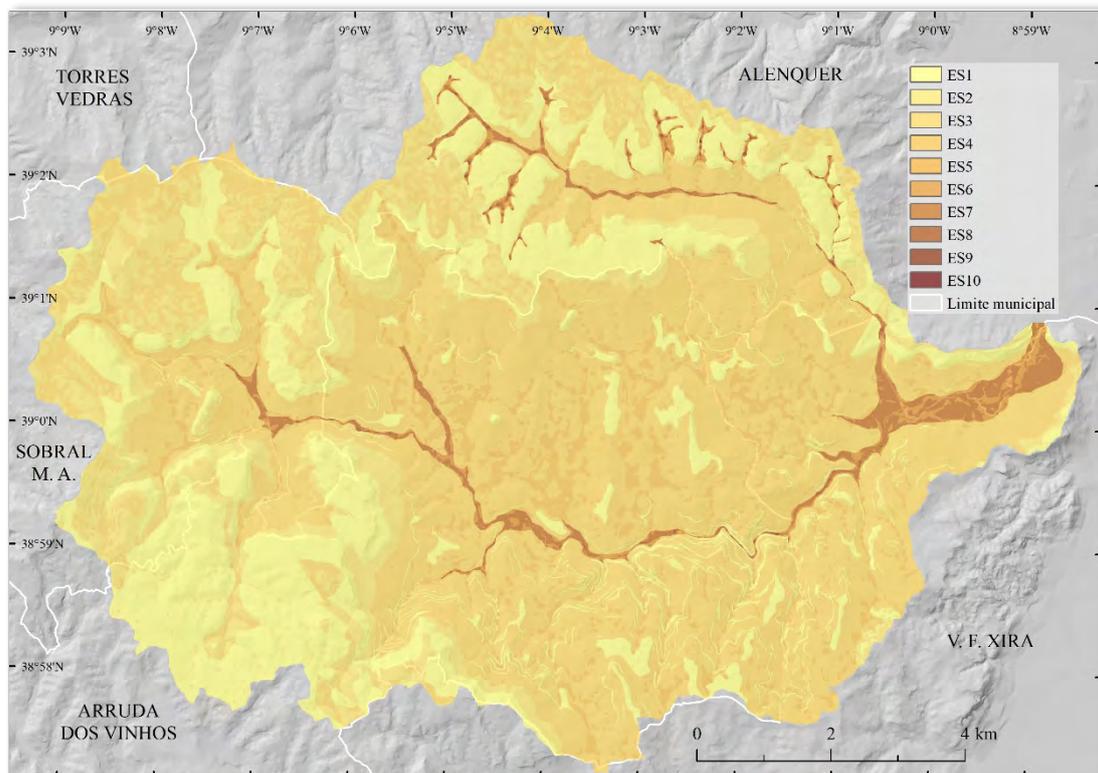


Figura 3.1.7. – Espessura do solo (m). ES1 = 0 – 0,5; ES2 = 0,5 – 1; ES3 = 1 – 1,5; ES4 = 1,5 – 2; ES5 = 2 – 2,5; ES6 = 2,5 – 3; ES7 = 3 – 3,5; ES8 = 3,5 – 4; ES9 = 4 – 4,5; ES10 = > 4,5.

Os primeiros 5 fatores elencados acima (declive das vertente, orientação das vertente, perfil planiforme das vertentes, *Topographic Position Index*, *Slope Over Area Ratio*), são derivados de um Modelo Digital de Elevação, com uma resolução espacial de 25 m²

por célula, proveniente das curvas de nível (com equidistância de 5 metros) e dos pontos cotados mencionados na Tabela 3.1.. A espessura do solo foi determinada com recurso ao modelo GIST de Catani *et al.* (2010) e a litologia é adaptada da geologia, também mencionadas na Tabela 3.1..

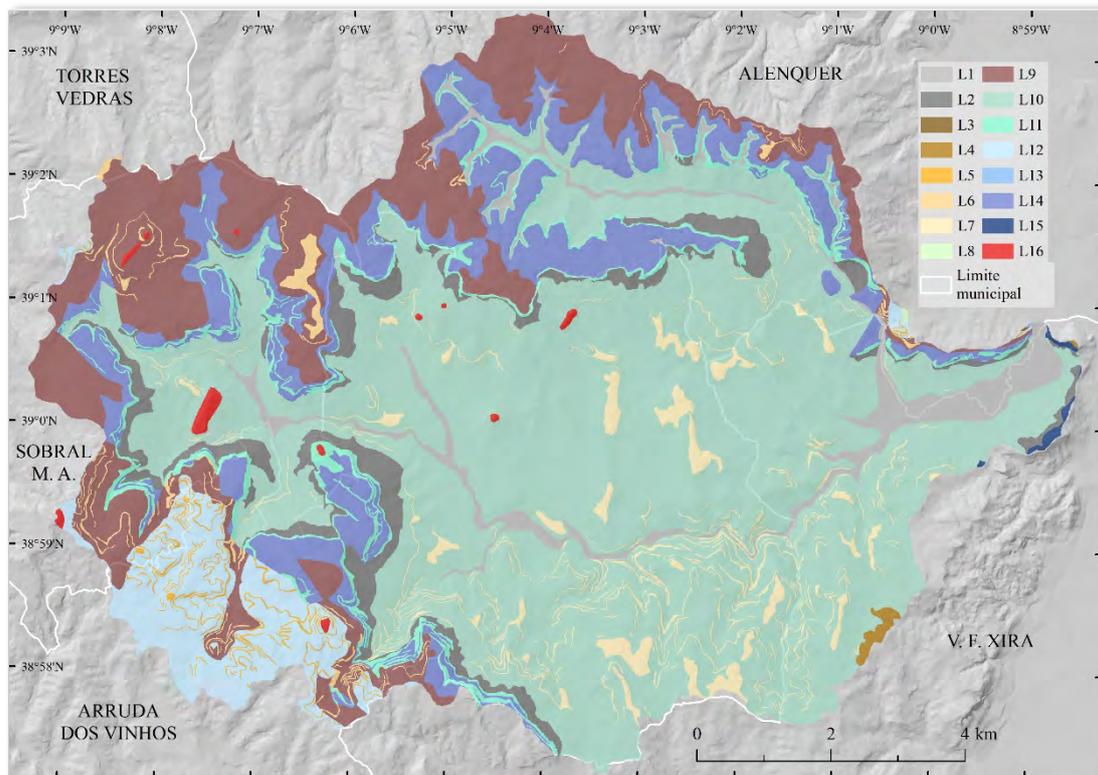


Figura 3.1.8. – Litologia. Para leitura da legenda, ver Tabela 3.1..

3.1.2. Métodos de avaliação, validação, classificação e análise da suscetibilidade

No âmbito deste trabalho foram desenvolvidos cinco modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente, de acordo com o tipo de movimento em estudo (DRP = deslizamentos rotacionais profundos; DRS = deslizamentos rotacionais superficiais; DTS = deslizamentos translacionais superficiais) e com as diferentes partições do inventário definidas para efeitos de treino do modelo e validação do mesmo: S₁-DRP, S₂-DRP, S₃-DRP, S₁-DRS e S₁-DTS.

Tabela 3.1. – Informação utilizada, caracterização e fontes.

| Informação geográfica | ID | Classes | Área (km ²) | Fonte |
|----------------------------------|-------|--|-------------------------|---|
| Limites das sub-bacias | | | 110,58 | Oliveira (2012) |
| Inventário | DRP | Deslizamentos rotacionais profundos | 6,76 | Oliveira (2012) e Oliveira <i>et al.</i> (2015a) |
| | DRS | Deslizamentos rotacionais superficiais | 0,32 | |
| | DTS | Deslizamentos translacionais superficiais | 0,05 | |
| Curvas de nível e pontos cotados | | | | Associação de Municípios do Oeste e C. M. de Vila Franca de Xira (1:10 000) |
| Modelo Digital de Elevação | | | 110,58 | Curvas de nível (equidistância de 5 metros) e pontos cotados |
| Geologia | | | 110,58 | Carta Geológica de Portugal (1:25 000 e 1:50 000) |
| Declive das vertentes (°) | D1 | 0 - 5 | 24,75 | Modelo Digital de Elevação (5 metros) |
| | D2 | 5 - 10 | 46,96 | |
| | D3 | 10 - 15 | 25,05 | |
| | D4 | 15 - 20 | 8,04 | |
| | D5 | 20 - 25 | 3,11 | |
| | D6 | 25 - 30 | 1,47 | |
| | D7 | 30 - 40 | 1,01 | |
| | D8 | > 40 | 0,18 | |
| Orientação das vertentes | E1 | Área plana | 0,58 | Modelo Digital de Elevação (5 metros) |
| | E2 | N | 12,39 | |
| | E3 | NE | 15,55 | |
| | E4 | E | 17,66 | |
| | E5 | SE | 13,71 | |
| | E6 | S | 12,26 | |
| | E7 | SO | 13,45 | |
| | E8 | O | 13,27 | |
| | E9 | NO | 11,71 | |
| Perfil planiforme das vertentes | C1 | Perfil planiforme côncavo | 24,46 | Modelo Digital de Elevação (5 metros) |
| | C2 | Perfil planiforme retilíneo/Área plana | 58,92 | |
| | C3 | Perfil planiforme convexo | 27,09 | |
| Topographic Position Index | TP11 | Fundo de vale | 0,95 | Modelo Digital de Elevação (5 metros) |
| | TP12 | Base de vertente | 4,96 | |
| | TP13 | Vertente côncava ou valeiro | 24,17 | |
| | TP14 | Vertente retilínea, área aplanada, rechã ou portela | 52,73 | |
| | TP15 | Vertente convexa ou colina | 20,43 | |
| | TP16 | Topo | 5,37 | |
| | TP17 | Linha de fecho, crista ou cornija | 1,96 | |
| Slope Over Area Ratio | SOAR1 | 0 | 1,48 | Modelo Digital de Elevação (5 metros) |
| | SOAR2 | 0 - 0,00001 | 1,21 | |
| | SOAR3 | 0,00001 - 0,0001 | 3,68 | |
| | SOAR4 | 0,0001 - 0,001 | 28,03 | |
| | SOAR5 | 0,001 - 0,01 | 66,12 | |
| | SOAR6 | 0,01 - 0,1 | 10,02 | |
| | SOAR7 | > 0,1 | 0,03 | |
| Espessura do solo (m) | ES1 | 0 - 0,5 | 27,35 | BeSafeSlide |
| | ES2 | 0,5 - 1 | 17,02 | |
| | ES3 | 1 - 1,5 | 55,15 | |
| | ES4 | 1,5 - 2 | 6,81 | |
| | ES5 | 2 - 2,5 | 0,26 | |
| | ES6 | 2,5 - 3 | 1,29 | |
| | ES7 | 3 - 3,5 | 2,50 | |
| | ES8 | 3,5 - 4 | 0,16 | |
| | ES9 | 4 - 4,5 | 0,02 | |
| | ES10 | > 4,5 | 0,002 | |
| Litologia | L1 | Aluviões | 4,23 | Carta Geológica de Portugal (1:25 000 e 1:50 000) |
| | L2 | Depósitos de vertente (Formação de Abadia) | 4,92 | |
| | L3 | Conglomerados, arenitos e argilitos (Formação de Benfica) | 0,004 | |
| | L4 | Arcoses (Formação de Abadia/Castanheira do Ribatejo) | 0,21 | |
| | L5 | Arenitos (Formação de Arranhó) | 0,68 | |
| | L6 | Arenitos (Formação de Sobral) | 1,03 | |
| | L7 | Arenitos (Formação de Abadia) | 4,13 | |
| | L8 | Arenitos, margas e calcários (Formação de Freixial) | 0,01 | |
| | L9 | Argilitos, arenitos, margas e calcários (Formação de Sobral) | 16,68 | |
| | L10 | Margas e argilitos (Formação de Abadia) | 55,71 | |
| | L11 | Margas (Formação de Amaral) | 3,98 | |
| | L12 | Calcários e margas (Formação de Arranhó) | 5,79 | |
| | L13 | Calcários (Formação de Benfica/Quinta da Marquesa) | 0,003 | |
| | L14 | Calcários (Formação de Amaral) | 12,71 | |
| | L15 | Calcários recifais (Quintas) | 0,15 | |
| | L16 | Filões | 0,34 | |

3.1.2.1. Partição dos inventários de movimentos de vertente

Para a definição dos modelos de suscetibilidade S₁-DRP, S₁-DRS e S₁-DTS, os inventários de treino e validação foram gerados de forma aleatória para uma proporção de 70 % para treino e 30 % para validação. Em termos absolutos traduz-se numa partição de 443 deslizamentos rotacionais profundos para treinar o modelo S₁-DRP e 190 para o validar; 239 deslizamentos rotacionais superficiais para treinar o modelo S₁-DRS e 103 para o validar; e 124 deslizamentos translacionais superficiais para treinar o modelo S₁-DTS e 54 para o validar. Para a definição do modelo de suscetibilidade S₂-DRP, a partição do inventário de deslizamentos teve em consideração a área dos deslizamentos. O valor de corte para isolar as duas partições do inventário pressupôs selecionar os 10 % dos deslizamentos de maior dimensão (63 deslizamentos) para treino do modelo, sendo que os restantes 90 % (570 deslizamentos) foram utilizados para validação. Estes 10 % correspondem ao número de deslizamentos com área superior a 37.409 m², valor que foi definido com base na rotura de uma curva de probabilidade de excedência de magnitude, definida por Oliveira (2012). O terceiro modelo de suscetibilidade, S₃-DRP, utiliza o inverso da partição utilizada em S₂-DRP. Os 570 deslizamentos que foram utilizados para validar o modelo S₂-DRP são utilizados como inventário de treino no modelo S₃-DRP. Os 63 deslizamentos restantes que foram utilizados para treinar o modelo S₂-DRP, foram utilizados para validar o modelo S₃-DRP.

3.1.2.2. Método de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente

Devido à sua simplicidade e geração de bons resultados (Zêzere, 2001), o Valor Informativo (VI, Yin e Yan, 1988) é um dos métodos mais utilizados e adequados para a avaliação de suscetibilidade a deslizamentos (e.g. Zêzere, 2001; Piedade *et al.*, 2011; Guillard e Zêzere, 2012; Pereira *et al.*, 2012; Corominas *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015b; Zêzere *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019), sendo também o método definido para a delimitação de áreas suscetíveis a movimentos de massa em vertente a integrar na Reserva Ecológica Nacional (Decreto-Lei nº 124/2019, de 28 de agosto). O método tem uma base Bayesiana e quantifica, em *scores*, a suscetibilidade para cada classe de cada

fator de predisposição, a partir da normalização logarítmica da razão entre a probabilidade condicionada de se encontrar um deslizamento numa determinada classe de um fator de predisposição na área de estudo e a probabilidade *a priori* de se encontrar um deslizamento na área de estudo (Yin e Yan, 1988, Piedade *et al.*, 2011; Guillard e Zêzere, 2012). O score de VI para cada classe de cada fator de predisposição é dado pela seguinte expressão (Yin e Yan, 1988):

$$li = \ln \frac{Si/Ni}{S/N} \quad (1)$$

em que li é o VI do fator i , Si é o número de unidades de terreno (células com resolução de 5 m) instabilizadas do fator i , Ni é o número de unidades de terreno do fator i , S é o número total de unidades de terreno instabilizadas, e N é o número total de unidades de terreno. Devido à normalização logarítmica, o VI não é determinado quando $Si = 0$. Nestes casos assume-se o VI como o decimal inferior ao VI mais baixo determinado. Os valores positivos demonstram que há uma relação entre a classe do fator de predisposição e a ocorrência de deslizamentos. Quanto mais elevado for o valor, mais forte é a relação. Valores negativos caracterizam áreas menos suscetíveis à ocorrência de deslizamentos (Zêzere, 2001; Piedade *et al.*, 2011; Garcia 2012). O valor de suscetibilidade final para cada unidade de terreno corresponde ao VI total, dado pela seguinte expressão (Yin e Yan, 1988):

$$lj = \sum_{i=1}^m Xji li \quad (2)$$

em que lj é o VI final de cada unidade de terreno, m é o número de fatores de predisposição, e Xji é igual a 0 ou 1, consoante o fator esteja ausente ou presente na unidade de terreno j , respetivamente.

3.1.2.3. Validação dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente

As curvas de sucesso e de predição têm sido amplamente utilizadas para a validação de modelos de suscetibilidade a fenômenos perigosos e a movimentos de vertente (Reichenbach *et al.*, 2018). A curva de sucesso define o grau de ajuste do modelo e é obtida pelo cruzamento entre o mapa de suscetibilidade e o inventário de ocorrências utilizado para o treino do modelo. A curva de predição, avalia de forma independente a capacidade preditiva de um modelo e é obtida pelo cruzamento entre o mapa de suscetibilidade e o inventário de ocorrências que não foi utilizado para treino do modelo de suscetibilidade. As curvas são construídas em gráfico de dispersão numa escala que varia entre 0 e 1 ou entre 0 e 100 %, em que nas abcissas e nas ordenadas são representadas a área total em estudo por ordem decrescente de suscetibilidade e a área de estudo deslizada, respetivamente (Chung e Fabbri, 2005). Após a construção dos gráficos, o bom ou mau desempenho do modelo é avaliado pelo desvio (positivo ou negativo) que as curvas têm em relação a uma diagonal traçada desde a origem do gráfico até ao seu valor máximo, traduzindo a relação entre a área deslizada e a área de estudo classificada como suscetível (Oliveira, 2012).

A Área Abaixo da Curva (AAC) de sucesso e de predição avalia quantitativamente o grau de ajuste e a capacidade preditiva de um modelo de suscetibilidade (Bi e Bennett, 2003) e varia numa escala de valores entre 0 e 1, sendo que, segundo Guzzetti *et al.* (2006), valores entre 0,75 e 0,8 correspondem a um modelo aceitável; valores entre 0,8 e 0,9 correspondem a um modelo muito bom; e valores superiores a 0,9 correspondem a um modelo excelente. A AAC é calculada pela seguinte expressão (Guzzetti *et al.*, 2006):

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(LS_i - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (3)$$

Em que $LS_i - L_i$ é a amplitude de cada classe; a_i é o valor da ordenada que corresponde a L_i ; e b_i é o valor da ordenada que corresponde a LS_i .

3.1.2.4. Classificação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente

Segundo Garcia *et al.* (2007), qualquer método que seja aplicado com o intuito de dividir a suscetibilidade em classes, desde que bem aplicado, consegue dar origem a mapas “corretos”; contudo, os autores também referem que existem métodos mais adaptados à realidade estudada do que outros e que estes devem ser propriamente validados com recurso a um inventário de deslizamentos. Deste modo, as classes de suscetibilidade foram definidas de forma a incluir a área suficiente para validar cumulativamente 50 %, 70 %, 85 %, 95 % e 100 % da área deslizada do grupo de validação, sendo que, posteriormente, estas cinco classes foram designadas como “Suscetibilidade Muito Elevada”, “Suscetibilidade Elevada”, “Suscetibilidade Moderada”, “Suscetibilidade Baixa” e “Suscetibilidade Muito Baixa” (e.g. a classe de Suscetibilidade Muito Elevada valida 50% da área deslizada do grupo de validação).

3.1.2.5. Análise de concordância espacial dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente

A concordância espacial permite avaliar as diferenças ao nível da distribuição espacial e estatística por par de mapas de suscetibilidade. Neste caso, pretende-se aferir as diferenças espaciais e estatísticas que resultam da utilização de diferentes critérios de partição do inventário de deslizamentos utilizado para avaliar a suscetibilidade. Deste modo, os três mapas de suscetibilidade gerados anteriormente foram comparados com recurso ao *Map Comparison Kit 3*, desenvolvido por Visser e de Nijs (2006), o que permite obter a concordância espacial entre mapas expressos em ficheiros matriciais. Para este efeito, o *software* utiliza a concordância espacial propriamente dita, ou seja, indica a percentagem de coincidência espacial em cada classe, mas também calcula a estatística *Kappa*. A estatística *Kappa*, introduzida por Cohen (1960) e já aplicada no contexto dos movimentos de vertente (e. g. Guzetti *et al.* 2006; Barella *et al.*, 2018), pode ser entendida e aplicada como uma medida de similaridade entre dois mapas, baseada numa tabela de contingência (Visser e de Nijs, 2006) e expressa-se da seguinte forma:

$$k = \frac{P_C - P_E}{1 - P_C}$$

(4)

Em que P_C é a probabilidade de concordância observada e P_E é a probabilidade de concordância esperada (Barella *et al.*, 2018). Devido à crescente aplicação, nas mais variadas áreas de estudo, a estatística *Kappa* tem evoluído nas mãos de outros autores, na medida em que têm surgido novos conceitos; porque a estatística *Kappa* não distingue *similaridade relativa a quantidade* de *similaridade relativa a localização*. Hagen (2002) introduziu o conceito de *Kappa histogram* e Pontius (2000) introduziu o conceito de *Kappa location*.

A diferença é que o *Kappa histogram* tem apenas em conta a quantidade de células, ou seja, a forma do histograma; o *Kappa location* considera apenas a distribuição espacial das células. Tendo em conta estes dois conceitos, a estatística *Kappa* pode ser simplificada deste modo (Visser e de Nijs, 2006):

$$k = k_{loc} * k_{hist}$$

(5)

Em que k_{loc} é o *Kappa location* e k_{hist} é o *Kappa histogram*.

Os resultados podem ser classificados/interpretados com o auxílio das indicações dadas por Landis e Koch (1977) ou McHugh (2012), resumidas na Tabela 3.2..

Tabela 3.2. – Comparação das classificações atribuídas aos diferentes graus de concordância por Landis e Koch (1977) e por McHugh (2012).

| Kappa | Concordância espacial | | Kappa |
|-------------|-----------------------|----------------|-------------|
| | Landis e Koch (1977) | McHugh (2012) | |
| 0 | Pobre | Nenhuma | < 0,20 |
| 0,10 - 0,20 | Ligeira | Mínima | 0,21 - 0,39 |
| 0,21 - 0,40 | Razoável | Fraca | 0,40 - 0,59 |
| 0,41 - 0,60 | Moderada | Moderada | 0,60 - 0,79 |
| 0,61 - 0,80 | Substancial | Forte | 0,80 - 0,90 |
| > 0,81 | Quase perfeita | Quase perfeita | > 0,90 |

3.1.3. Hierarquização das sub-bacias

A hierarquização das sub-bacias, do ponto de vista da suscetibilidade, é uma etapa importante, visto que permite identificar sub-bacias críticas, isto é, que carecem de mais atenção relativamente à incidência espacial de deslizamentos.

A hierarquização das sub-bacias, no âmbito deste trabalho, irá coadjuvar na validação das áreas críticas de suscetibilidade e de risco. Para a hierarquização das sub-bacias, foi aplicada a metodologia ilustrada no esquema da Figura 3.1.9..

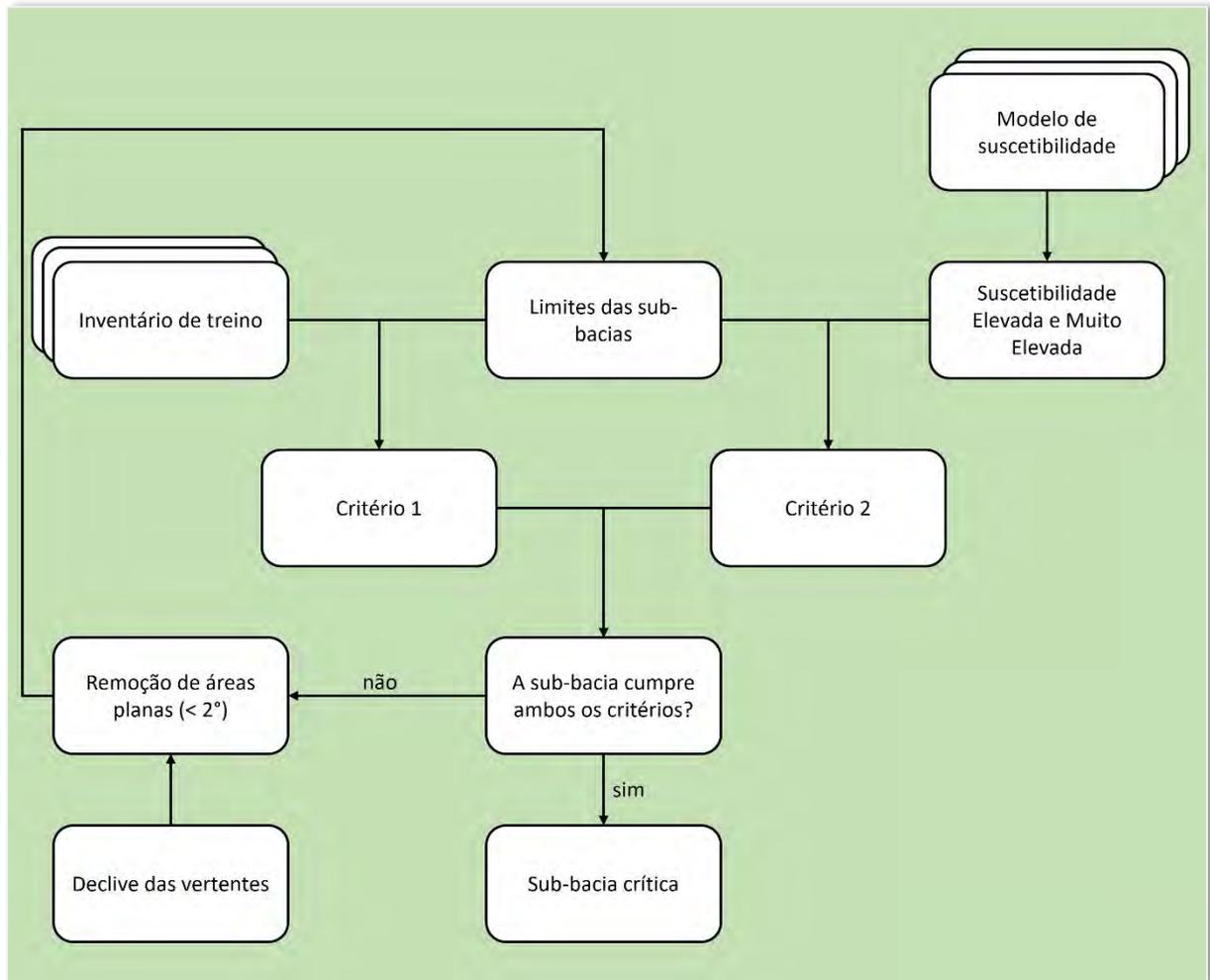


Figura 3.1.9. – Metodologia aplicada para a hierarquização das sub-bacias.

A metodologia obedece a dois critérios: o Critério 1 e o Critério 2. Para que uma sub-bacia cumpra o Critério 1, este obriga a que a densidade de deslizamentos nessa sub-bacia seja superior à densidade de deslizamentos na bacia do Rio Grande da Pipa. A densidade de deslizamentos da sub-bacia é calculada da seguinte forma:

$$dmv_{sb} = \frac{amv_{sb}}{a_{sb}}$$

(6)

Em que dmv_{sb} é a densidade de movimentos na sub-bacia; amv_{sb} é a área de todos os deslizamentos na sub-bacia; e a_{sb} é a área da sub-bacia. A densidade de deslizamentos na bacia do Rio Grande da Pipa é expressa do seguinte modo:

$$dmv_{RGP} = \frac{amv_{RGP}}{a_{RGP}} \quad (7)$$

Em que dmv_{RGP} é a densidade de movimentos na bacia do Rio Grande da Pipa; amv_{RGP} é a área de todos os deslizamentos na bacia do Rio Grande da Pipa; e a_{RGP} é a área da bacia do Rio Grande da Pipa.

Para que uma sub-bacia cumpra o Critério 2, este obriga a que o peso da área suscetível na sub-bacia seja superior ao peso da área suscetível na bacia do Rio Grande da Pipa. Nesta etapa do trabalho entende-se por “área suscetível” como a área classificada com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada, isto é, a área necessária para validar 70 % da área deslizada do inventário utilizado para validação. O peso da área suscetível na sub-bacia é calculado da seguinte forma:

$$pas_{sb} = \frac{as_{sb}}{a_{sb}} \quad (8)$$

Em que pas_{sb} é o peso da área suscetível na sub-bacia; as_{sb} é a área suscetível na sub-bacia; e a_{sb} é a área da sub-bacia. O peso da área suscetível na bacia do Rio Grande da Pipa é expresso do seguinte modo:

$$pas_{RGP} = \frac{as_{RGP}}{a_{RGP}} \quad (9)$$

Em que pas_{RGP} é o peso da área suscetível na bacia do Rio Grande da Pipa; as_{RGP} é a área suscetível na bacia do Rio Grande da Pipa; e a_{RGP} é a área da bacia do Rio Grande da Pipa.

No final, uma sub-bacia será considerada crítica se cumprir, simultaneamente, ambos os critérios. Para evitar excluir sub-bacias que potencialmente podem ser classificadas como críticas nesta abordagem, por apresentarem valores próximos em termos de densidade aos encontrados na bacia do Rio Grande da Pipa, o procedimento foi realizado salvaguardando que o cálculo das densidades apenas tinha em consideração as áreas não planas, para o efeito, vertentes com declive superior a 2°.

3.2. Avaliação das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente

Os dados utilizados para a definição das áreas críticas de suscetibilidade (*susceptibility hotspots*), cujo esquema concetual se encontra ilustrado na Figura 3.2., provêm das partições efetuadas ao inventário, referidas no subcapítulo 3.1.2.1., e no mapa de suscetibilidade S₁-DRP, obtido a partir de um dos modelos de suscetibilidade produzidos com a metodologia definida em 3.1.. A metodologia pode ser replicada desta forma, sequencialmente:

- i. Transformação do inventário utilizado para treino do modelo de suscetibilidade S₁-DRP em estrutura matricial;
- ii. Transformação do inventário utilizado para treino do modelo de suscetibilidade S₁-DRP, onde cada célula é convertida num ponto (centroide da célula);
- iii. Transformação das classes de suscetibilidade Elevada e Muito Elevada de S₁-DRP, onde cada célula é convertida num ponto (centroide da célula);
- iv. Derivação de dois mapas de densidade de pontos por m² (*point density* do ArcMap), um para cada uma das malhas de pontos anteriormente geradas e referidas nas alíneas ii. e iii. No cálculo de densidade de pontos é utilizado um raio de pesquisa de 387 metros, definido pelo diâmetro do maior deslizamento do inventário de treino do modelo de suscetibilidade S₁-DRP;
- v. Soma do mapa de densidade de pontos relativo ao inventário de treino de S₁-DRP com o mapa de densidade de pontos relativo às classes de suscetibilidade Elevada e Muito Elevada de S₁-DRP.

- vi. Classificação dos resultados com base em diferentes classes de desvio-padrão.

As áreas críticas de suscetibilidade correspondem às classificadas com um desvio-padrão mais elevado.

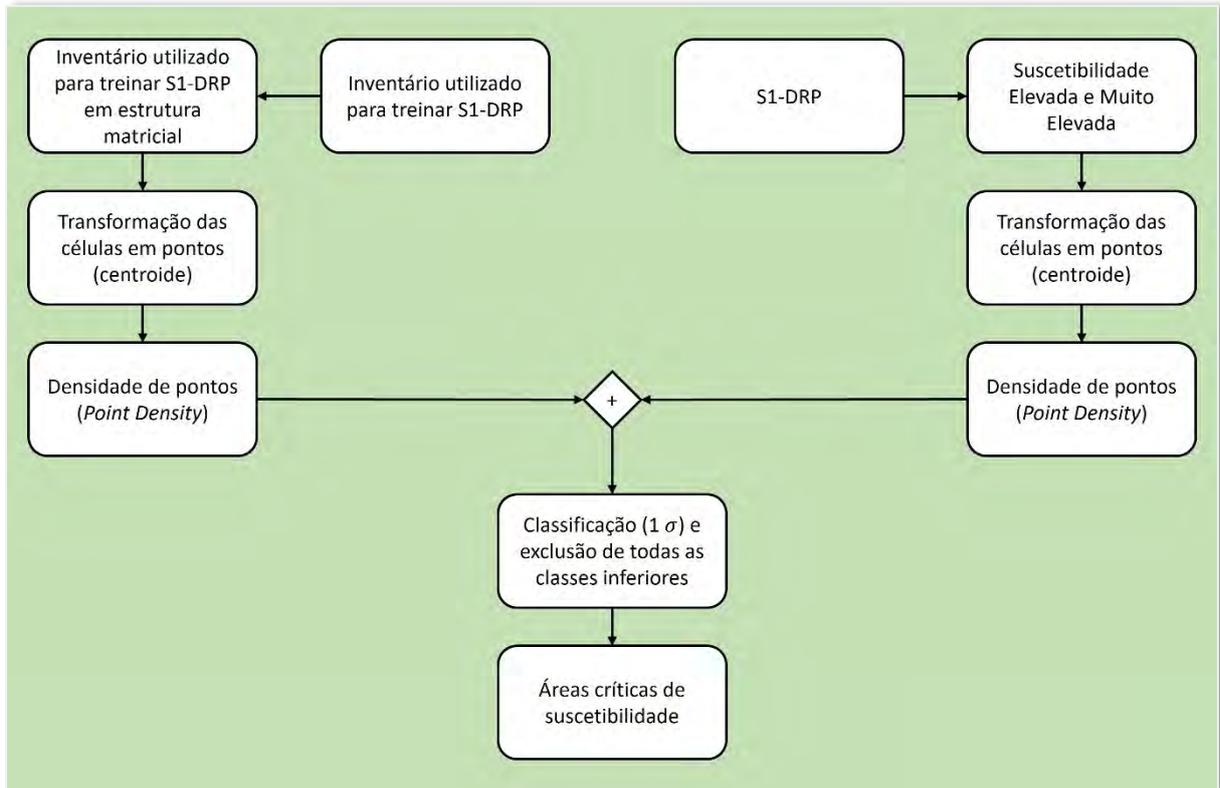


Figura 3.2. – Metodologia final aplicada para a avaliação das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente.

3.3. Avaliação da exposição a movimentos de vertente

A exposição a movimentos de vertente no presente estudo é avaliada considerando diferentes tipos de elementos expostos (edifícios, população, EEEVS e rede viária) e diferentes tipos de movimentos de vertente: deslizamentos rotacionais profundos, deslizamentos rotacionais superficiais e deslizamentos translacionais superficiais.

3.3.1. Avaliação de edifícios e da população exposta a movimentos de vertente

A população exposta a movimentos de vertente foi avaliada de acordo com a metodologia esquematizada na Figura 3.3.1.. Este esquema metodológico pretende-se aplicável independentemente do tipo de movimento de vertente considerado.

3.3.1.1. Informação de base

A informação de base considerada para avaliar a população exposta a movimentos de vertente consta na seguinte enumeração e é apresentada, de forma mais detalhada, na Tabela 3.3.:

- i. Áreas classificadas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada a deslizamentos rotacionais profundos (obtidas a partir do modelo S₁-DRP, desenvolvido no subcapítulo 3.1.);
- ii. Distribuição espacial do edificado, em 2011, materializada num tema pontual, georreferenciado (centroide), onde cada ponto corresponde a um edifício com a informação relativa ao número de alojamentos (Base de Georreferenciação de Edifícios – BGE – do Instituto Nacional de Estatística);
- iii. População residente e estrutura etária, em 2011, por subsecção estatística (Base Geográfica de Referenciação de Informação – BGRI – do Instituto Nacional de Estatística);
- iv. Ortofotomapas e imagens de satélite relativos aos anos de 1995, 2011 e 2018.

Após a obtenção da informação de base anteriormente mencionada, recorreu-se, primeiramente, ao cálculo da distribuição dasimétrica da população residente em 2011 por edifício, de acordo com a metodologia proposta por Garcia *et al.* (2016).

Posteriormente, procedeu-se à fotointerpretação dos ortofotomapas de 1995 e imagens de satélite de 2011 e 2018, com o objetivo de (i) identificar e cartografar, através de pontos, a distribuição espacial do edificado, em 1995; (ii) corrigir as coordenadas de alguns pontos correspondentes ao edificado, em 2011; (iii) acrescentar a localização de edifícios residenciais que não foram considerados durante o recenseamento, em 2011; e (iv) identificar e cartografar, através de pontos e a partir da distribuição espacial do

edificado em 2011, a distribuição do edificado, em 2018. Este conjunto de passos permitiu a obtenção da distribuição espacial do edificado para 1995, 2011 e 2018.

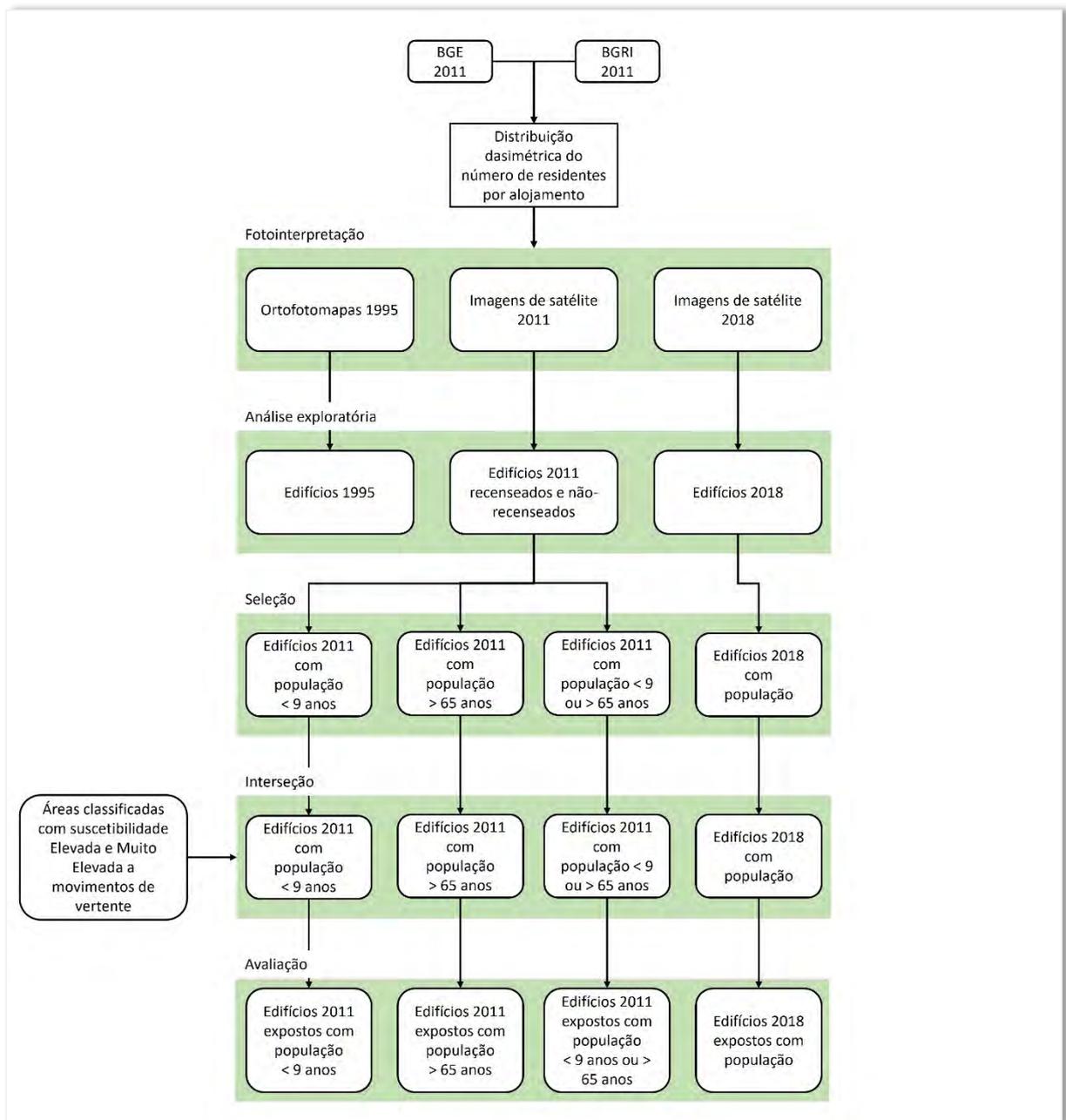


Figura 3.3.1. – Processo metodológico aplicado para a avaliação da população exposta a movimentos de vertente.

Contudo, estas bases de dados requerem algum cuidado na sua utilização. Por exemplo, a base elaborada com o edificado, em 1995, não contém informação sobre a população residente nesse ano, pelo que serve apenas para análise exploratória (ver subcapítulo 2.4.). Também os edifícios que foram acrescentados à base de dados de

2011 não contêm dados de população residente e, por essa razão, não foram considerados para a avaliação da exposição. Por outro lado, assumiu-se que os edifícios que albergavam população residente em 2011 mantiveram-se nesse estado até 2018. Ainda, os que foram acrescentados à base de dados de 2018, durante a fotointerpretação, também foram considerados como edifícios com população residente. Estas assunções possibilitaram ultrapassar, neste trabalho, a inexistência de dados de população residente para os novos edifícios identificados nas imagens de 2018, que se adicionaram à base de dados.

Tabela 3.3. – Informação de base utilizada, características e fonte.

| TEMA | ESTRUTURA | CLASSES | FONTE |
|--------------------------|----------------------|--|---|
| S1-DRP | Matricial | Elevada Muito Elevada | Subcapítulo 3.1. |
| Edifícios 2011 | Vetorial (Pontos) | Edifícios | BGE 2011 (Instituto Nacional de Estatística) |
| População residente 2011 | Vetorial (Polígonos) | População residente População residente <= 9 Anos População residente >= 65 Anos População residente <= 9 ou >= 65 Anos | BGRI 2011 (Instituto Nacional de Estatística) |
| Ortofotomapas 1995 | Matricial | | Direção-Geral do Território |
| Imagens de satélite 2011 | Matricial | | Landsat 7 (Google Earth Pro) |
| Imagens de satélite 2018 | Matricial | | World Imagery (Esri) |

3.3.1.2. Método de avaliação de edifícios e da população exposta a movimentos de vertente

Após o pré-processamento dos dados, a estimativa da população exposta a deslizamentos rotacionais profundos foi realizada tendo em conta os edifícios com população residente, em 2018, bem como os grupos segmentados de acordo com as seguintes faixas etárias: i) população residente com idade igual ou inferior a 9 anos, em 2011; ii) população residente com idade igual ou superior a 65 anos, em 2011; e iii) população residente com idade igual ou inferior a 9 ou idade igual ou superior a 65 anos, em 2011. No âmbito da avaliação da população exposta, pretendeu-se analisar as faixas etárias anteriormente referidas por representarem grupos populacionais que, de forma geral, se consideram mais vulneráveis face a perigos naturais, ainda que a influência do fator idade na definição de vulnerabilidade social seja muito discutível, devido ao impacto que as normas sociais têm na mortalidade causada por este tipo de perigos (Pollock e Wartman, 2020).

Para a avaliação da população exposta a deslizamentos rotacionais profundos, procedeu-se à interseção dos edifícios mencionados com as áreas classificadas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada, o que permitiu estimar, quer o número total de edifícios com residentes expostos, como também o número de edifícios com residentes expostos distribuídos pelas faixas etárias anteriormente referidas.

3.3.2. Avaliação de Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis e da rede viária exposta a movimentos de vertente

Como outros elementos expostos a movimentos de vertente para o presente estudo foram considerados os Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis (EEEVS) e a rede viária. A distribuição destes elementos expostos aos diferentes tipos de movimentos de vertente (deslizamentos rotacionais profundos, deslizamentos rotacionais superficiais e deslizamento translacionais superficiais) foi avaliada de acordo com a metodologia esquematizada na Figura 3.3.2.. Para ambos os tipos de elementos expostos, foi considerada a informação mais recente disponível e que permitisse uma harmonização com o restante estudo, isto é, serem identificáveis nas imagens de satélite de 2018.

3.3.2.1. Informação de base

A informação de base considerada neste subcapítulo para avaliar a exposição de EEEVS e da rede viária consta na seguinte enumeração e, de forma mais detalhada, nas Tabelas 3.4. e 3.5.:

- i. Áreas classificadas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada a deslizamentos rotacionais profundos, deslizamentos rotacionais superficiais e deslizamentos translacionais superficiais (obtidas, respetivamente, a partir dos modelos S₁-DRP, S₁-DRS e S₁-DTS, descritos no subcapítulo 3.1.);
- ii. Distribuição espacial dos Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis (EEEVS);
- iii. Localização das infraestruturas abrangidas pela Diretiva SEVESO III;

- iv. Traçado da rede viária da bacia;
- v. Localização dos viadutos na rede viária da bacia.

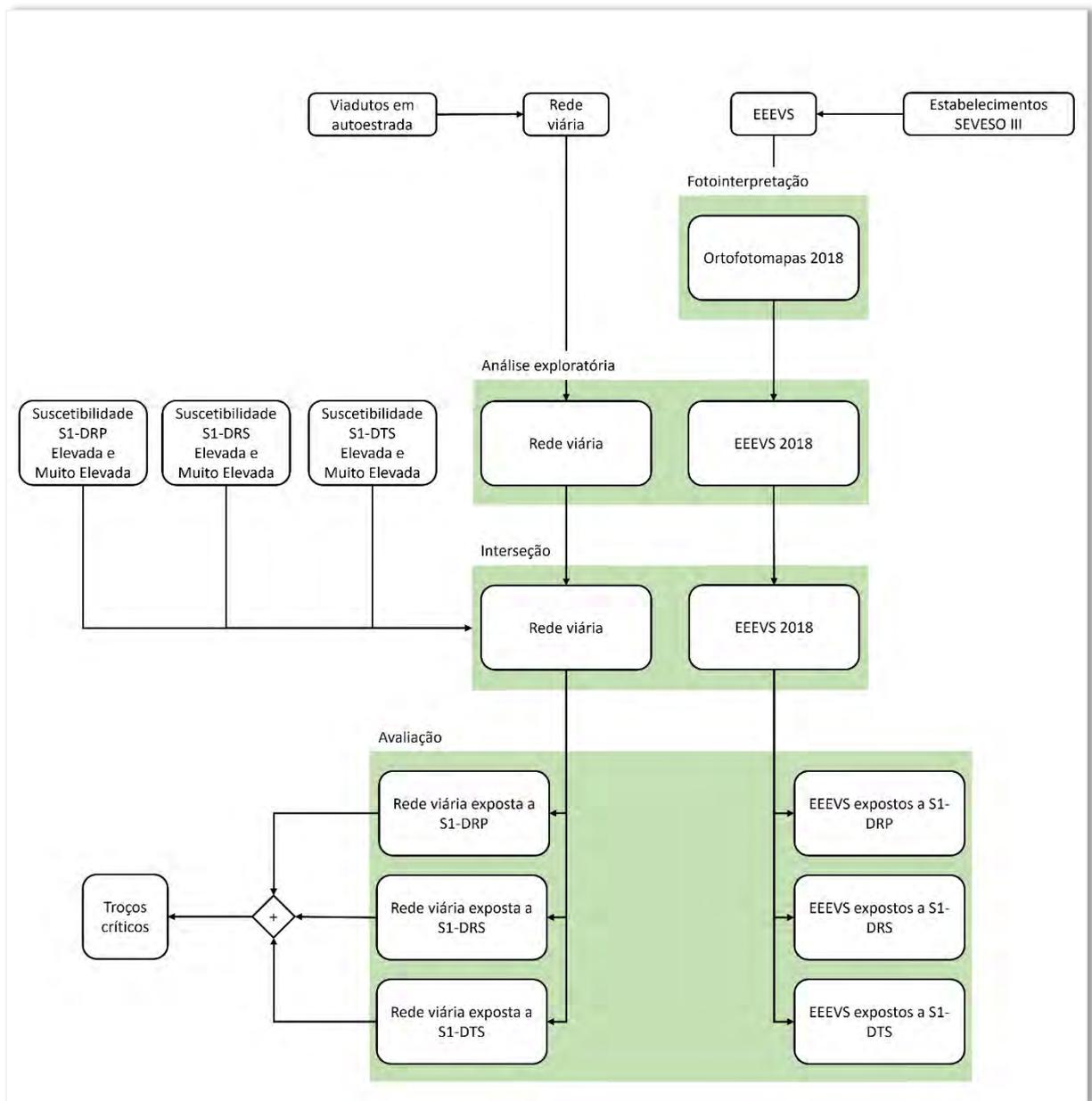


Figura 3.3.2. – Processo metodológico aplicado para a avaliação de EEEVS e da rede viária exposta a diferentes tipos de movimentos de vertente.

Face à base de dados original dos EEEVS, desenvolvida por Alves (2018) apenas para a área do município de Arruda dos Vinhos que drena para a bacia do Rio Grande da Pipa, procedeu-se às seguintes alterações de classificação: as classes Estufa e Fábrica foram integradas num só tema, designado Complexo Industrial/Armazém/Pavilhão; a classe Posto de Transformação passou a designar-se por Componente de Rede Elétrica,

a qual integrará outros tipos de infraestruturas (aerogeradores e postes de alta tensão). Além destas alterações, antes da sua integração, a base de dados foi atualizada para o ano de 2018 e para toda a bacia do Rio Grande da Pipa. Para esse efeito, recorreu-se à fotointerpretação das imagens de satélite referidas na Tabela 3.4..

Tabela 3.4. – Informação de base utilizada para a avaliação dos elementos expostos.

| TEMA | ESTRUTURA | CLASSES | FONTE |
|--|-------------------------|--|--|
| S1-DRP | Matricial | Elevada Muito Elevada | Subcapítulo 3.1. |
| S1-DRS | Matricial | Elevada Muito Elevada | Subcapítulo 3.1. |
| S1-DTS | Matricial | Elevada Muito Elevada | Subcapítulo 3.1. |
| EEEVS | Vetorial (Polígonos) | Área de Serviço Câmara Municipal Escola Estufa Fábrica Gasómetro Hospital/Centro de Saúde Igreja/Capela Posto de Transformação Quartel Serviço Municipal | Alves (2018) |
| Estabelecimentos abrangidos pela Diretiva SEVESO III | Vetorial (Pontos) | | Agência Portuguesa do Ambiente |
| Rede viária | Vetorial (Linhas) | Autoestrada Estrada primária Estrada secundária Estrada terciária | OpenStreetMap |
| Viadutos da rede viária | Vetorial (Linhas) | | Laboratório Nacional de Energia e Geologia |
| Imagens de satélite 2018 | Matricial | | World Imagery (Esri) |

Foram adicionadas as seguintes entradas à base de dados:

- i. 1 Área SEVESO;
- ii. 50 Complexos Industriais/Armazéns/Pavilhões;
- iii. 16 Componentes de Rede Elétrica;
- iv. 13 Escolas;
- v. 10 Igrejas/Capelas;
- vi. 2 Serviços Municipais;

vii. 5 Supermercados.

Por se tratar de edifícios contíguos, foram agregadas 2 Áreas de Serviço e 2 Quartéis, em relação aos dados originais (Alves, 2018). Assim, as 4 Áreas de Serviço passaram a 3 e os 5 Quartéis passaram a 4.

Tabela 3.5. – Classes da base de dados de EEEVS atualizada para o ano de 2018 e utilizada para a avaliação de exposição.

| TEMA | ESTRUTURA | CLASSES |
|-------|-------------------------|--------------------------------------|
| EEEVS | Vetorial (Polígonos) | Área de Serviço |
| | | Área SEVESO |
| | | Câmara Municipal |
| | | Complexo Industrial/Armazém/Pavilhão |
| | | Componente de Rede Elétrica |
| | | Escola |
| | | Gasómetro |
| | | Hospital/Centro de Saúde |
| | | Igreja/Capela |
| | | Quartel |
| | | Serviço Municipal |
| | | Supermercado |

3.3.2.2. Método de avaliação dos EEEVS e da rede viária exposta a movimentos de vertente

O método de avaliação dos elementos expostos consiste na interseção entre as áreas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada de cada um dos mapas de suscetibilidade (S₁-DRP, S₁-DRS e S₁-DTS) com cada um dos EEEVS e com a rede viária. Isto significa que todos os EEEVS e troços de rede viária que se localizam em áreas de suscetibilidade Elevada a Muita Elevada foram classificados como EEEVS expostos e rede viária exposta.

Relativamente à avaliação da exposição da rede viária a deslizamentos rotacionais superficiais e translacionais superficiais (S₁-DRS e S₁-DTS), não foram considerados os segmentos correspondentes aos viadutos da classe Autoestradas. Foi assumido que estes tipos de movimentos de vertente por terem uma superfície de rutura a pouca profundidade, inferior a 1,5 m no contexto geológico e geomorfológico da bacia do Rio

Grande da Pipa, não comprometem a estabilidade dos pilares que suportam esses troços.

A operação utilizada para a obtenção dos troços críticos foi a soma dos valores previamente atribuídos (valor 1) aos troços da rede viária expostos a DRP, DRS e DTS. Assim, os troços críticos equivalem aos troços que, pela soma, ficam com o valor 3 (exposição simultânea aos três tipos de movimentos de vertente em análise).

3.4. Avaliação das áreas críticas de risco

A distribuição das áreas críticas de risco (*risk hotspots*) foi avaliada de acordo com a metodologia esquematizada na Figura 3.4. e está sustentada na integração das áreas classificadas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada com a distribuição do edificado e distribuição da população por edifício residencial na área de estudo. Para a avaliação das áreas críticas de risco não foram utilizados os EEEVS nem a rede viária. A informação de base utilizada encontra-se descrita na Tabela 3.6.

3.4.1. Informação de base

De acordo com a metodologia proposta, a definição de áreas críticas de risco tem em consideração a distribuição do edificado (ver subcapítulo 3.3.1.) e dois tipos de atributos: a (i) população residente em cada edifício, discriminada, quando possível, por grupo etário; e a (ii) classe de suscetibilidade que intersecta cada edifício. Para o efeito, o tema com a distribuição do edificado foi cruzado com o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos, classificado. A presença de população residente permite incluir o edifício na avaliação, dependendo da faixa etária que se queira avaliar. A classe de suscetibilidade da área onde se encontra cada edifício é a variável de entrada no modelo utilizado para a avaliação de áreas críticas de risco. A distribuição de suscetibilidade S₁-DRP, descrita no subcapítulo 3.1., foi selecionada para derivar o nível de risco, por ser o indicador mais adequado para modelar áreas críticas.

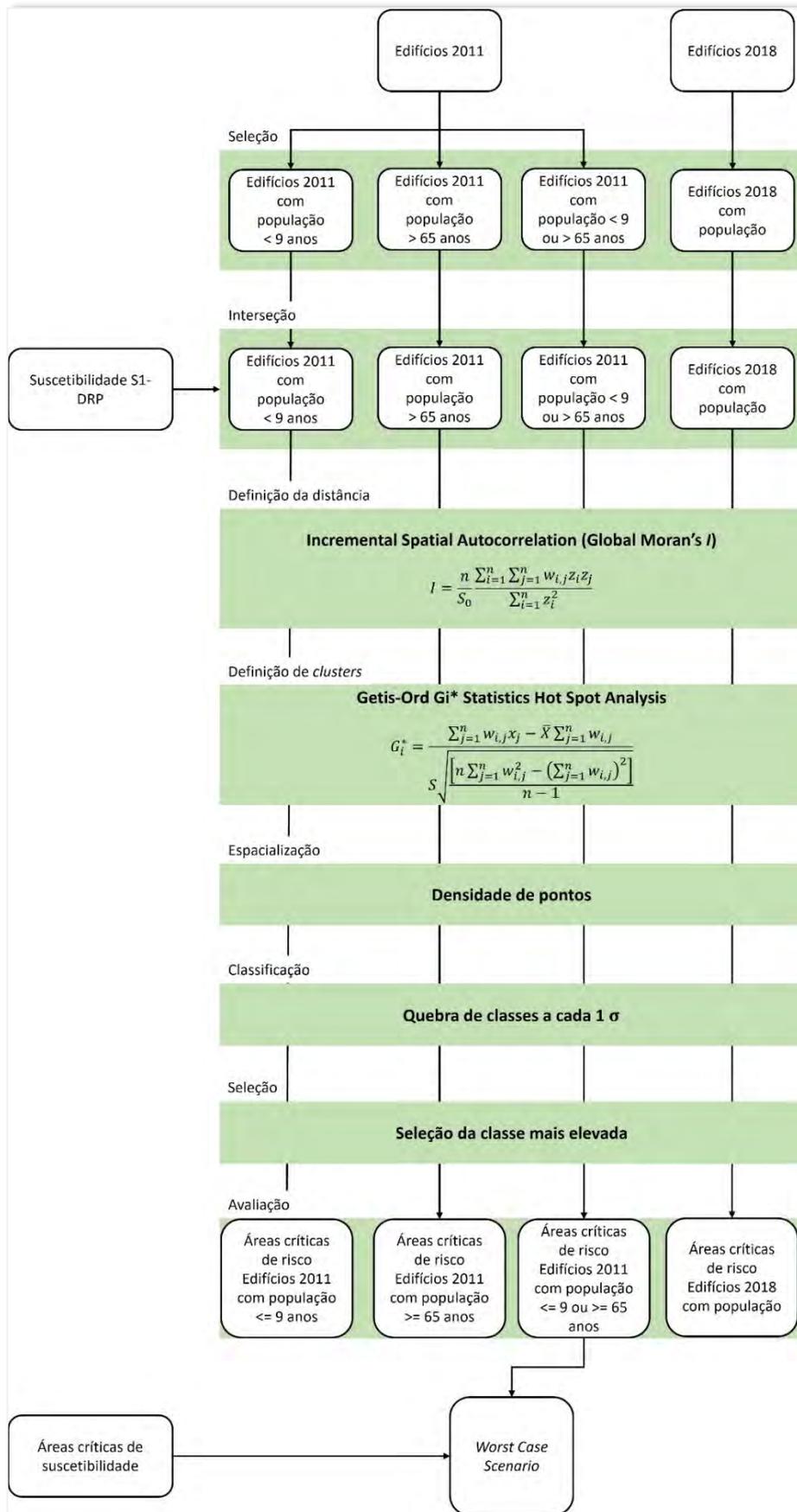


Figura 3.4. – Processo metodológico aplicado para a avaliação das áreas críticas de risco.

As áreas críticas de risco foram avaliadas com base nos edifícios e estimativa da população residente em 2011 e 2018, considerando os seguintes elementos:

- i. Edifícios com população residente de todas as faixas etárias, em 2018;
- ii. Edifícios com população residente com idade igual ou inferior a 9 anos, em 2011;
- iii. Edifícios com população residente com idade igual ou superior a 65 anos, em 2011;
- iv. Edifícios com população residente com idade igual ou inferior a 9 anos ou com idade igual ou superior a 65 anos, em 2011.

Relativamente aos elementos elencados no ponto i., considerou-se que todos os edifícios identificados em 2018 têm população residente. Com este conjunto de dados sobre os elementos expostos e a sua distribuição por faixas etárias como referido nos pontos ii., iii. e iv., torna-se possível avaliar áreas críticas de risco, visto que, para cada edifício, foi possível identificar a classe de suscetibilidade a movimentos de vertente da área onde se localiza e um conjunto de pessoas consideradas vulneráveis.

Tabela 3.6. – Informação de base utilizada para a avaliação dos edifícios e da população exposta.

| TEMA | ESTRUTURA | CLASSES | FONTE |
|----------------|-------------------|---|------------------|
| S1-DRP | Matricial | 1 (Muito Baixa) 2 (Baixa) 3 (Moderada) 4 (Elevada) 5 (Muito Elevada) | Subcapítulo 3.1. |
| Edifícios 2011 | Vetorial (Pontos) | Edifícios com População Residente < 9 Anos Edifícios com População Residente > 65 Anos Edifícios com População Residente < 9 ou > 65 Anos | Subcapítulo 3.3. |
| Edifícios 2018 | Vetorial (Pontos) | Edifícios 2011 ainda existentes em 2018 com População Residente 2011 Edifícios recém-construídos (2011-2018) | Subcapítulo 3.3. |

3.4.2. Métodos de avaliação das áreas críticas de risco

O método utilizado para a avaliação de áreas críticas de risco baseia-se no modelo de estatística local G_i^* de Getis e Ord (1992) e de Ord e Getis (1995), conhecido coloquialmente por análise de *hotspots*. A análise de *hotspots* permite a deteção de áreas de associação espacial, testando, neste caso, se um determinado edifício e outros

edifícios considerados vizinhos constituem um *cluster* de valores de suscetibilidade acima ou abaixo da média. O método atribui, a cada edifício, um *z-score* (desvio-padrão) e um *p-value* (probabilidade de independência), que são integrados em conjunto para estimar a significância estatística de autocorrelação espacial. Neste caso, para cada edifício, a análise de *hotspots* indica um *clustering* estatisticamente significativo com níveis de 90 % (*p-value*=0,1), 95 % (*p-value*=0,05) e 99 % (*p-value*=0,01) de confiança, correspondendo a *z-scores* de $\pm 1,65$, $\pm 1,96$ e $\pm 2,58$, respetivamente. Os *z-scores* positivos indicam aglomerados de edifícios em risco e que cujos padrões de associação espacial são incomuns para serem um resultado do acaso. O método pode ser aplicado com a seguinte equação (Getis e Ord, 1992; Ord e Getis, 1995; Rogerson, 2001; Mitchell, 2005):

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}} \quad (10)$$

Em que $w_{i,j}$ é um peso variável entre > 0 e 1 , consoante um edifício j esteja mais distante ou mais próximo de um edifício i (mas dentro de uma determinada distância relativa a um edifício i), ou 0 , caso não esteja dentro de uma determinada distância relativa a um edifício i ; x_j é o valor de suscetibilidade atribuído ao edifício j ; n é o número total de edifícios; e \bar{X} e S são, respetivamente, a média e o desvio-padrão da suscetibilidade associada à distribuição do edificado (Getis e Ord, 1992; Ord e Getis, 1995; Rogerson, 2001; Mitchell, 2005):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (12)$$

A distância relativa a cada edifício i foi considerada tendo em conta o efeito do decaimento da distância sobre as relações espaciais. O efeito do decaimento da distância sobre as relações espaciais, patente em Tobler (1970), demonstra que a força da interação entre dois pontos é inversa à distância entre ambos. Este efeito foi introduzido no método de avaliação com a escolha de um parâmetro de distância inversa, que obriga o processo de computação a dar sempre mais importância a edifícios j mais próximos de um edifício i do que a outros edifícios j mais distantes. Esta diferenciação entre edifícios j próximos (vizinhos) ou distantes de um edifício i foi definida com base numa circunferência centrada em cada edifício i , em que a vizinhança de um edifício i é determinada em função dos edifícios j que estejam dentro dessa circunferência. Neste caso, todos os edifícios j que estavam a mais de 350 metros de um edifício i , não foram considerados vizinhos deste. Para cada edifício i , a computação foi constrangida a partir dessa distância, dado que essa é a distância até à qual se dá um aumento da autocorrelação espacial, culminando num pico de valor máximo, e diminuindo a partir daí. Este valor foi obtido previamente através da determinação do Índice Global de Moran I , um método que permite medir a autocorrelação espacial de uma população estatística, baseando-se na sua localização e nos valores da variável que essa população representa, e tendo sido calculado especificamente para o efeito a vários incrementos de distância (Moran, 1948, 1950; Rogerson, 2001; Mitchell, 2005; Li *et al.*, 2007):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{S_0 \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (13)$$

Em que z_i é o desvio da suscetibilidade de um edifício i em relação à sua média ($x_i - \bar{X}$); $w_{i,j}$ é um peso igual a 1 ou a 0, consoante um edifício j esteja mais próximo ou distante de um edifício i ; n é o número total de edifícios; e S_0 é a soma de todos os pesos $w_{i,j}$ (Rogerson, 2001; Mitchell, 2005; Li *et al.*, 2007):

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (14)$$

Os *z-scores* de I (z_I) são computados da seguinte forma (Rogerson, 2001; Mitchell, 2005; Li *et al.*, 2007):

$$z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (15)$$

Em que (Rogerson, 2001; Mitchell, 2005; Li *et al.*, 2007):

$$E[I] = \frac{-1}{n - 1} \quad (16)$$

$$V = E[I^2] - E[I]^2 \quad (17)$$

Após a modelação, os níveis de confiança foram transformados para uma superfície contínua através do cálculo da densidade de pontos. Para esta operação foi utilizado um raio de pesquisa de 387 metros, valor que já tinha sido obtido no subcapítulo 3.2. Os resultados foram classificados através do método do desvio-padrão. Este método de classificação permite retratar os dados tendo em conta a sua dispersão em relação à média. Relacionando o tema deste trabalho com o objetivo deste método de classificação, que permite salientar áreas de valores extremos, a aplicação de desvios-padrão prevê-se adequado. De todas as classes foi selecionado o desvio-padrão mais elevado para a representação das áreas críticas de risco.

No final, as áreas críticas de risco relativas à população com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos foram interseccionadas com as áreas críticas de suscetibilidade, de modo a derivar as superfícies que delimitam áreas onde coexiste suscetibilidade crítica e risco crítico, associado à exposição de uma população mais vulnerável.

IV

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a aplicação da metodologia referida no capítulo III **Informação de base e métodos de avaliação**. Este capítulo encontra-se dividido, tal como o que antecede, em quatro subcapítulos, cada um destinado aos tópicos abordados ao longo desta dissertação: (i) a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, (ii) a definição das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente, (iii) a avaliação da exposição a movimentos de vertente, e (iv) a definição das áreas críticas de risco.

4.1. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente

4.1.1. Modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente

A avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente permitiu a obtenção de *scores* do Valor Informativo (VI), que, após a integração nos diferentes modelos de suscetibilidade (S₁-DRP, S₂-DRP, S₃-DRP, S₁-DRS, S₁-DTS), possibilitaram uma hierarquização do território em áreas mais suscetíveis e menos suscetíveis aos diferentes tipos de instabilidade geomorfológica em estudo (Figuras 4.1.1. a 4.1.5.). A presença de *scores* positivos e elevados, indica, em cada fator de predisposição, quais as classe mais favoráveis à ocorrência dos diferentes tipos de deslizamentos (Zêzere *et al.*, 2017). Por contraste, para os *scores* de VI com valor negativo, quanto menor for o valor, menos suscetível é essa classe. Os *scores* de VI obtidos apontam, nesta área de estudo, para um padrão generalizado dos locais mais/menos favoráveis para a ocorrência destes tipos de deslizamentos, permitindo, ao mesmo tempo, reconhecer o conjunto de características do território que governam a ocorrência de cada tipo de movimento de vertente. De acordo com os *scores* de VI apresentados na Tabela 4.1., verifica-se uma tendência para que as áreas com declive mais acentuado sejam as mais suscetíveis; no entanto, é relevante realçar que, no caso dos deslizamentos rotacionais profundos de maior magnitude (S₂-DRP), parece existir alguma associação também

Tabela 4.1. – Scores do Valor Informativo calculados para cada um dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa. A vermelho estão realçados os melhores scores para cada combinação fator de predisposição – modelo de suscetibilidade (> 1); os scores que indicam menos suscetibilidade para cada combinação (< -1) estão realçados a verde.

| Fator | ID | Classes | VI | | | | |
|---------------------------------|-------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | S1-DRP | S2-DRP | S3-DRP | S1-DRS | S1-DTS |
| Declive das vertentes (*) | D1 | 0 - 5 | -2,554 | -2,263 | -3,241 | -2,024 | -2,831 |
| | D2 | 5 - 10 | -0,095 | 0,063 | 0,387 | -0,382 | -2,555 |
| | D3 | 10 - 15 | 0,487 | 0,452 | 0,544 | 0,557 | 0,182 |
| | D4 | 15 - 20 | 0,556 | 0,232 | 0,890 | 0,682 | 1,195 |
| | D5 | 20 - 25 | 0,539 | 0,140 | 0,914 | 0,935 | 1,780 |
| | D6 | 25 - 30 | 0,627 | 0,347 | 0,928 | 1,002 | 2,199 |
| | D7 | 30 - 40 | 0,904 | 0,824 | 1,036 | 1,194 | 2,715 |
| | D8 | > 40 | 1,170 | 1,080 | 1,258 | 0,755 | 2,342 |
| Orientação das vertentes | E1 | Área plana | -2,705 | -3,121 | -2,361 | -2,234 | -1,100 |
| | E2 | N | 0,106 | -0,300 | 0,465 | 0,531 | 0,252 |
| | E3 | NE | 0,141 | -0,026 | 0,317 | 0,490 | 0,291 |
| | E4 | E | 0,078 | 0,030 | 0,140 | 0,402 | 0,269 |
| | E5 | SE | 0,104 | 0,204 | -0,053 | -0,800 | -0,505 |
| | E6 | S | 0,301 | 0,541 | -0,125 | -1,550 | -1,030 |
| | E7 | SO | 0,039 | 0,315 | -0,506 | -0,258 | -0,014 |
| | E8 | O | -0,600 | -0,588 | -0,570 | -0,158 | 0,031 |
| | E9 | NO | 0,555 | 0,986 | -0,188 | -0,489 | -0,051 |
| Perfil planiforme das vertentes | C1 | Perfil planiforme côncavo | 0,290 | 0,226 | 0,384 | 0,265 | 0,459 |
| | C2 | Perfil planiforme retilíneo/Área plana | -0,191 | -0,132 | -0,289 | -0,255 | -0,409 |
| | C3 | Perfil planiforme convexo | 0,071 | 0,039 | 0,116 | 0,194 | 0,186 |
| Topographic Position Index | TPI1 | Fundo de vale | -0,316 | -0,323 | -0,351 | -0,012 | 1,180 |
| | TPI2 | Base de vertente | -0,025 | -0,157 | 0,119 | 0,093 | 0,458 |
| | TPI3 | Vertente côncava ou valeiro | 0,115 | -0,033 | 0,275 | 0,242 | 0,363 |
| | TPI4 | Vertente retilínea, área aplanada, rechã ou portela | 0,192 | 0,279 | 0,059 | -0,026 | -0,342 |
| | TPI5 | Vertente convexa ou colina | -0,611 | -0,672 | -0,487 | -0,159 | 0,083 |
| | TPI6 | Topo | -0,930 | -1,235 | -0,644 | -0,475 | -0,455 |
| | TPI7 | Linha de festo, crista ou cornija | -0,876 | -1,291 | -0,524 | -0,433 | -0,071 |
| Slope Over Area Ratio | SOAR1 | 0 | -1,901 | -2,087 | -1,741 | -1,745 | -1,243 |
| | SOAR2 | 0 - 0,00001 | -2,081 | -2,141 | -2,034 | -0,857 | -1,048 |
| | SOAR3 | 0,00001 - 0,0001 | -0,381 | -0,144 | -0,851 | -1,175 | -1,270 |
| | SOAR4 | 0,0001 - 0,001 | 0,261 | 0,426 | -0,018 | -0,041 | -1,528 |
| | SOAR5 | 0,001 - 0,01 | -0,038 | -0,145 | 0,092 | 0,095 | 0,183 |
| | SOAR6 | 0,01 - 0,1 | -0,273 | -0,363 | -0,162 | -0,106 | 0,839 |
| | SOAR7 | > 0,1 | 0,088 | -0,653 | 0,631 | -0,252 | 0,574 |
| Espessura do solo (m) | ES1 | 0 - 0,5 | -0,360 | -0,679 | -0,037 | 0,053 | 0,650 |
| | ES2 | 0,5 - 1 | 0,538 | 0,559 | 0,544 | 0,305 | 0,746 |
| | ES3 | 1 - 1,5 | 0,083 | 0,157 | -0,048 | 0,011 | -0,961 |
| | ES4 | 1,5 - 2 | -1,287 | -1,164 | -1,524 | -0,949 | -2,154 |
| | ES5 | 2 - 2,5 | -0,929 | -2,239 | -0,278 | -2,286 | -2,300 |
| | ES6 | 2,5 - 3 | -1,800 | -2,828 | -1,189 | -2,800 | -2,300 |
| | ES7 | 3 - 3,5 | -2,560 | -2,702 | -2,440 | -2,695 | -3,716 |
| | ES8 | 3,5 - 4 | -1,846 | -2,262 | -1,563 | -1,305 | -2,300 |
| | ES9 | 4 - 4,5 | -1,676 | -2,829 | -0,833 | -0,799 | -2,300 |
| | ES10 | > 4,5 | -2,700 | -2,829 | -2,441 | -2,800 | -2,300 |
| Litologia | L1 | Aluviões | -2,067 | -2,744 | -1,584 | -2,947 | -2,297 |
| | L2 | Depósitos de vertente (Formação de Abadia) | 1,675 | 1,773 | 1,577 | 0,797 | 1,104 |
| | L3 | Conglomerados, arenitos e argilitos (Formação de Benfica) | -4,400 | -6,777 | -3,650 | -3,000 | -2,400 |
| | L4 | Arcoses (Formação de Abadia/Castanheira do Ribatejo) | -4,309 | -6,777 | -3,649 | -3,000 | -2,400 |
| | L5 | Arenitos (Formação de Arranhó) | -0,921 | -6,776 | -0,083 | 1,113 | 1,680 |
| | L6 | Arenitos (Formação de Sobral) | -1,185 | -2,889 | -0,460 | 0,872 | 1,774 |
| | L7 | Arenitos (Formação de Abadia) | -0,490 | -1,093 | -0,009 | 0,033 | 0,619 |
| | L8 | Arenitos, margas e calcários (Formação de Freixial) | -4,400 | -6,777 | -3,649 | -3,000 | -2,400 |
| | L9 | Argilitos, arenitos, margas e calcários (Formação de Sobral) | -1,905 | -2,965 | -1,296 | -0,301 | -0,207 |
| | L10 | Margas e argilitos (Formação de Abadia) | 0,110 | 0,185 | -0,022 | -0,001 | -0,856 |
| | L11 | Margas (Formação de Amaral) | 0,772 | 0,539 | 1,028 | 0,564 | 1,906 |
| | L12 | Calcários e margas (Formação de Arranhó) | -0,966 | -2,064 | -0,314 | 0,588 | 0,241 |
| | L13 | Calcários (Formação de Benfica/Quinta da Marquesa) | -4,400 | -6,777 | -3,650 | -3,000 | -2,400 |
| | L14 | Calcários (Formação de Amaral) | -0,945 | -1,054 | -0,812 | -1,064 | -0,999 |
| | L15 | Calcários recifais (Quintas) | -1,932 | -6,777 | -1,089 | -3,000 | -2,400 |
| | L16 | Filões | -0,670 | -6,777 | 0,178 | 0,903 | 1,717 |

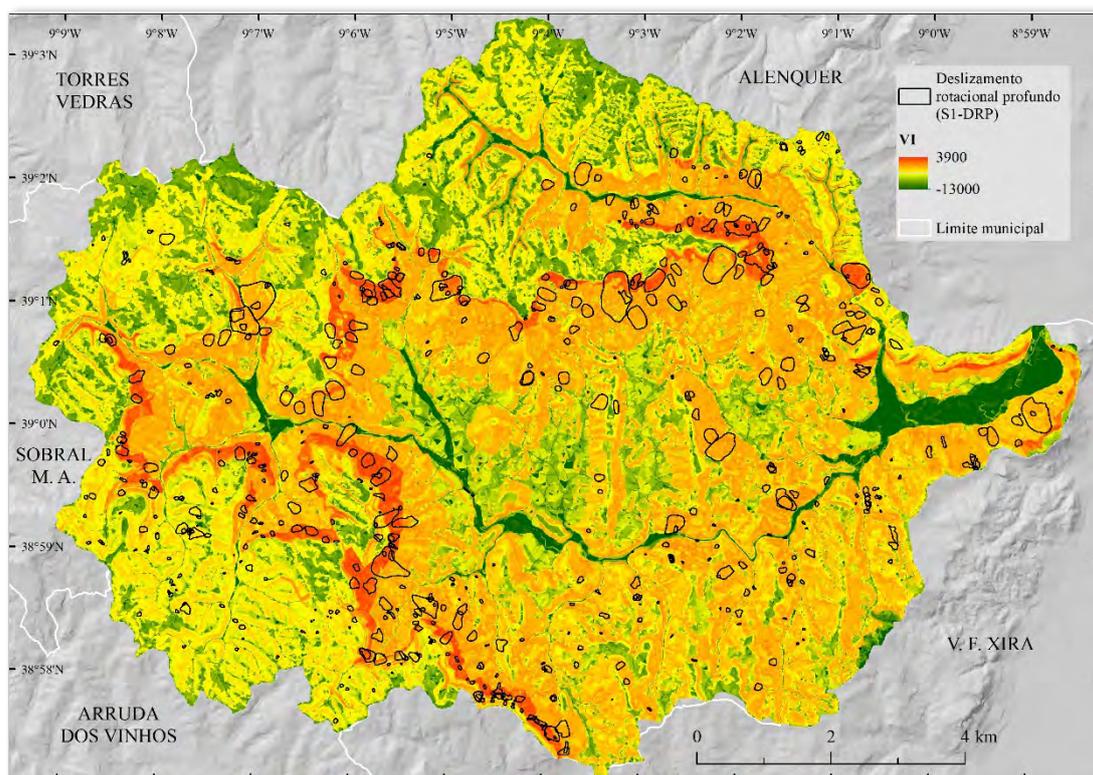


Figura 4.1.1. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais profundos, produzida pelo modelo S1-DRP.

com as áreas cuja inclinação se situa entre os 10° e 15° . A importância das áreas de declives mais acentuados ($> 40^\circ$) parece diminuir considerando a ocorrência dos deslizamentos mais profundos, como atestam os scores obtidos para os modelos S1-DRP (VI=1,170) S2-DRP (VI=1,080) e S3-DRP (VI=1,258). A importância dos declives mais acentuados para a ocorrência de deslizamentos parece ser mais relevante para a ocorrência de deslizamentos superficiais e, em particular, para o zonamento das áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS; VI=2,342).

O fator orientação das vertentes, só por si não permite grande diferenciação espacial, uma vez que os valores de VI concentram-se genericamente em torno de zero. De acordo com Garcia (2012), um valor de zero indica que a variável em causa tem uma densidade de movimentos idêntica à densidade média registada na área em estudo, pelo que a sua relação com a instabilidade é inconclusiva. Ainda assim é possível distinguir duas situações: (i) a ocorrência de deslizamentos rotacionais profundos (S1-DRP) e deslizamentos rotacionais profundos de maior magnitude (S2-DRP) é um

pouco mais favorável em áreas expostas ao quadrante Sul (SE, S e SO), muito porque se concentram nessas áreas as vertentes anaclinais mais extensas da área de estudo e com comprimento para a ocorrência dos movimentos de vertente de maiores dimensões; (ii) os deslizamentos rotacionais profundos de menor magnitude (S₃-DRP), os deslizamentos rotacionais superficiais (S₁-DRS) e os deslizamentos translacionais superficiais (S₁-DTS) tendem a ocorrer em vertentes expostas ao quadrante Nordeste (N, NE e E).

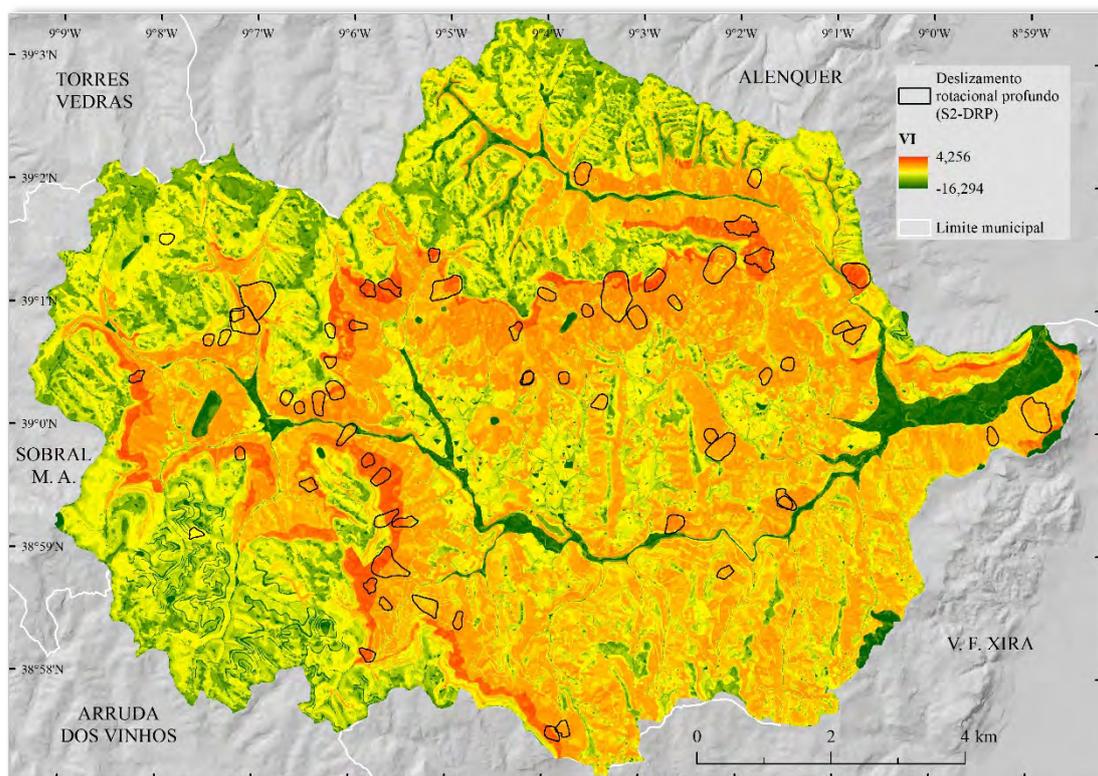


Figura 4.1.2. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais profundos, produzida pelo modelo S₂-DRP.

Os scores atribuídos às vertentes de perfil transversal côncavo, ainda que não muito elevados, permitem concluir que a convergência e concentração do escoamento favorece a ocorrência de deslizamentos, independentemente do tipo, na bacia do Rio Grande da Pipa.

Os scores atribuídos ao *Topographic Position Index* (TPI) ilustram duas situações: (i) os deslizamentos rotacionais profundos (S₁-DRP, S₂-DRP e S₃-DRP) ocorrem em vertentes retilíneas, áreas aplanadas, rechãs ou portelas (TPI₄), vertentes côncavas ou

valeiros (TPI₃) e bases de vertente (TPI₂); (ii) os deslizamentos rotacionais superficiais e deslizamentos translacionais superficiais ocorrem em vertentes côncavas ou valeiros (TPI₃), bases de vertente (TPI₂) e fundos de vale (TPI₁). Não é suposto os deslizamentos ocorrerem em áreas aplanadas ou fundos de vale; no entanto, como a cicatriz dos movimentos de vertente de maior dimensão pode cruzar áreas aplanadas, cruzando a linha de alto da vertente e afetando o topo, e nas áreas de acumulação a massa mobilizada por estes movimentos pode estabilizar em áreas topográficas menos acidentadas, compreendem-se os resultados obtidos.

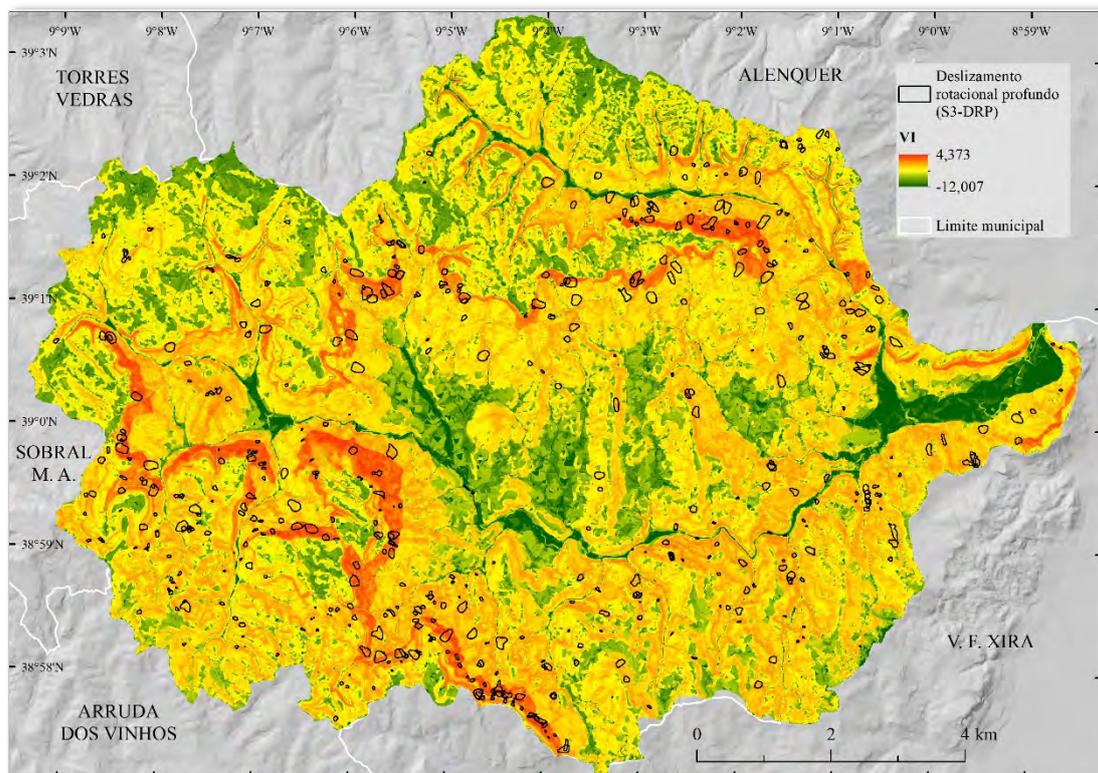


Figura 4.1.3. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais profundos, produzida pelo modelo S3-DRP.

No caso do *Slope Over Area Ratio* (SOAR), verifica-se uma tendência para que as áreas com maior disponibilidade hídrica tenham mais propensão para a instabilidade geomorfológica. Genericamente, este aumenta nas áreas de vertente, associadas às classes SOAR₄ e/ou SOAR₅. No caso dos deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS), parece adquirir particular relevância nas áreas de interflúvio definidas pelas classes SOAR₆ e SOAR₇.

Quanto à espessura do solo, as classes que evidenciam maior propensão para a ocorrência de deslizamentos estão, de forma geral, associadas a solos menos espessos, com menos de 1 metro de profundidade, podendo chegar a 1,5 m no caso dos modelos ligados à presença de deslizamentos rotacionais profundos e de maior magnitude (S2-DRP), ainda assim com scores de VI razoavelmente baixos.

Sobre a litologia, os depósitos de vertente (L2) e as margas (L11) são as unidades litológicas que mais condicionam a ocorrência de deslizamentos rotacionais profundos (S1-DRP, S2-DRP e S3-DRP); os arenitos (L5) são os que mais influenciam a ocorrência de deslizamentos rotacionais superficiais (S1-DRS); enquanto que os depósitos de vertente (L2), os arenitos (L5 e L6), as margas (L11), e os filões (L16), são as unidades mais importantes para a ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS).

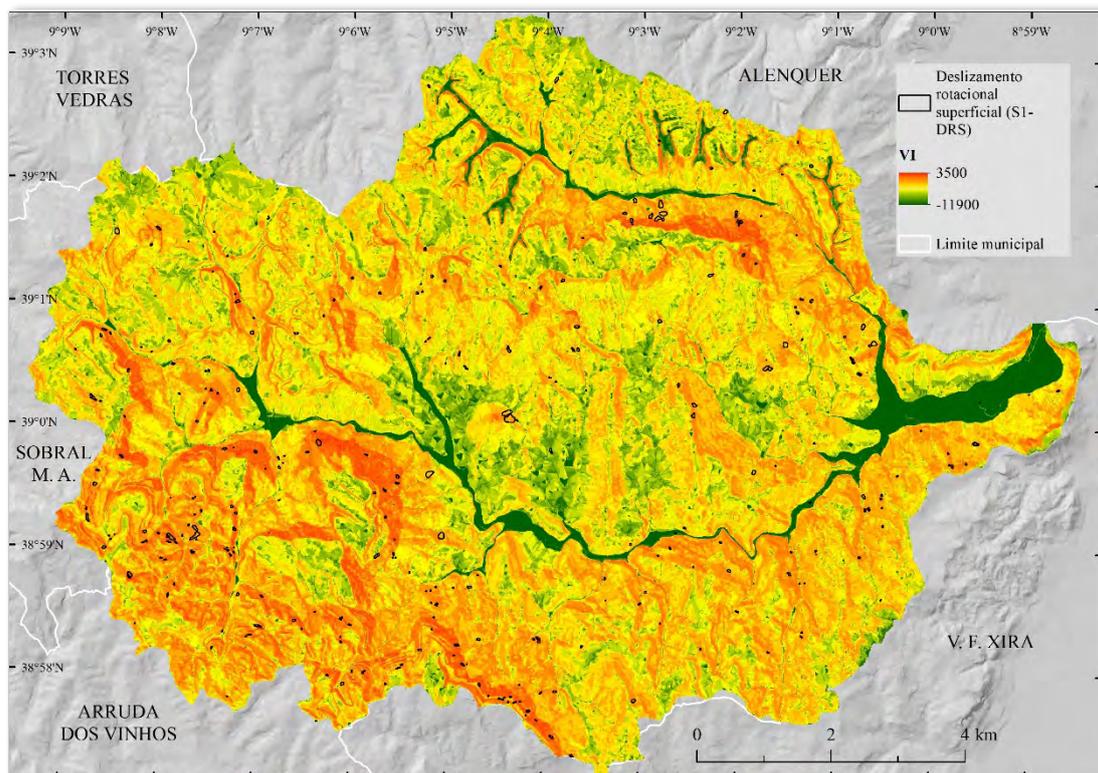


Figura 4.1.4. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos rotacionais superficiais, produzida pelo modelo S1-DRS.

Com estes resultados, podemos concluir que, de forma geral, os deslizamentos rotacionais profundos e de maior magnitude (S1-DRP, S2-DRP) formam um *cluster* de

ocorrências condicionadas por fatores similares, o que era expectável, dado o peso que os deslizamentos rotacionais profundos de maiores dimensões (S₂-DRP) têm no inventário total da área de estudo, e pelo facto destes estarem contidos no inventário utilizado para o treino do modelo S₁-DRP, gerando algum enviesamento na análise.

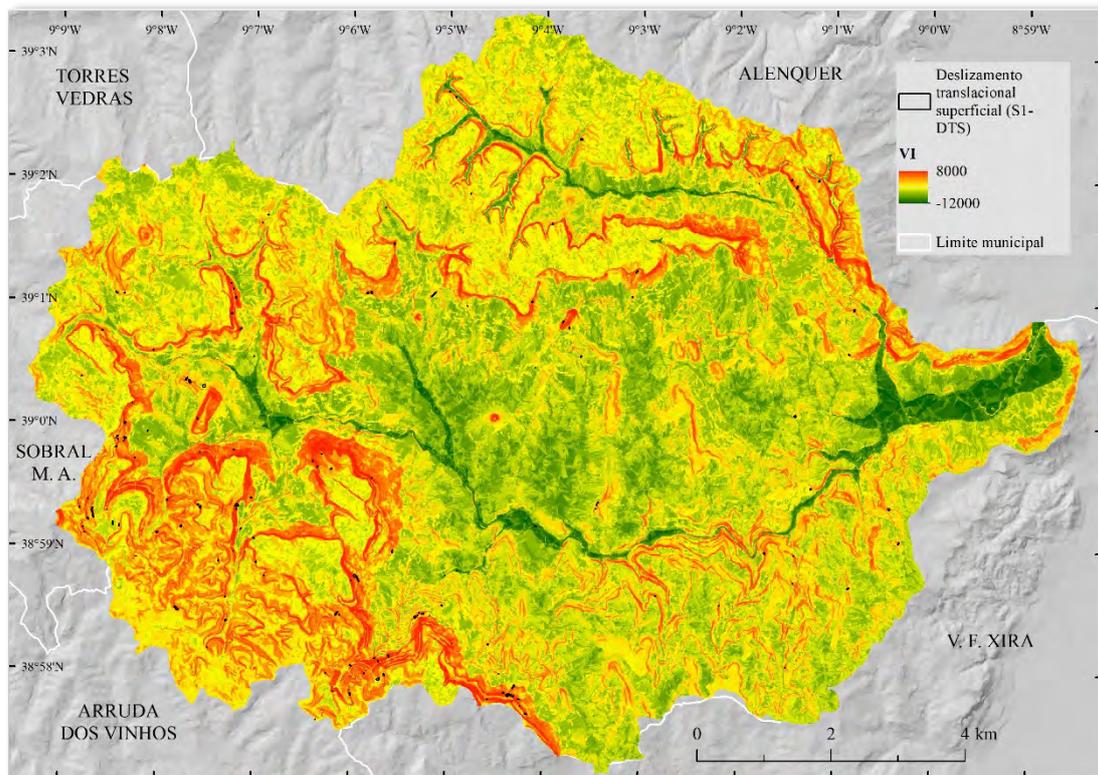


Figura 4.1.5. – Distribuição da suscetibilidade não classificada a deslizamentos translacionais superficiais, produzida pelo modelo S1-DTS.

Quando separados do inventário utilizado para treino do modelo S₁-DRP, os deslizamentos rotacionais profundos de menor magnitude (S₃-DRP) ocorrem em condições mais próximas das que promovem a ocorrência de deslizamentos rotacionais superficiais e translacionais superficiais (S₁-DRS e S₁-DTS, respetivamente).

4.1.2. Validação dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente

Após a avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, os resultados foram validados. A primeira etapa da validação, aferida através de curvas de sucesso e predição (Figura 4.1.6.), estabelece uma relação entre a percentagem de área deslizada acumulada e a área de estudo acumulada por ordem decrescente de suscetibilidade.

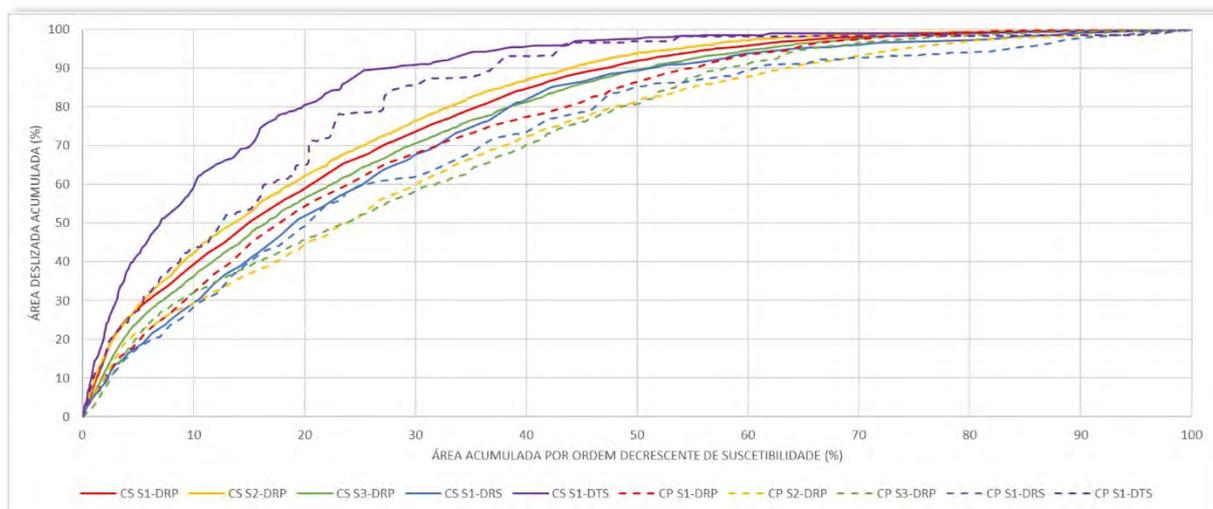


Figura 4.1.6. – Curvas de Sucesso (CS) e Curvas de Predição (CP) associadas a cada modelo de suscetibilidade: S1-DRP, S2-DRP, S3-DRP, S1-DRS, S1-DTS.

Por norma, espera-se que, quer o ajuste dos dados ao modelo como a respetiva capacidade preditiva, sejam melhores quanto menos área suscetível for necessária para englobar a totalidade de área deslizada, ou seja, quanto maior for a área abaixo de cada curva (Tabela 4.2.), embora Zêzere *et al.* (2017) tenham chegado à conclusão que uma maior capacidade preditiva de um modelo em relação a outro, não é, condição suficiente para ser considerado um melhor modelo.

Tabela 4.2. – Áreas Abaixo das Curvas de Sucesso e Predição associadas a cada modelo de suscetibilidade: S1-DRP, S2-DRP, S3-DRP, S1-DRS, S1-DTS.

| Modelo | AAC de Sucesso | AAC de Predição |
|--------|----------------|-----------------|
| S1-DRP | 0,80 | 0,76 |
| S2-DRP | 0,81 | 0,72 |
| S3-DRP | 0,78 | 0,72 |
| S1-DRS | 0,76 | 0,73 |
| S1-DTS | 0,88 | 0,84 |

Normalmente, a área abaixo da curva (AAC) de sucesso de um modelo de suscetibilidade é superior à área abaixo da curva de predição do mesmo (Chung e Fabbri, 2003), e é exatamente o que acontece em todos os modelos executados neste trabalho. Segundo os critérios de Guzzetti *et al.* (2006), S1-DRP e S1-DTS têm um valor de AAC que representa um ajuste muito satisfatório e uma capacidade preditiva aceitável a muito satisfatória, sendo, teoricamente, os melhores modelos de suscetibilidade; S2-DRP tem até um ajuste melhor do que S1-DRP, mas a capacidade

preditiva está abaixo do limiar mínimo considerado pelos mesmos autores (0,75); S₃-DRP e S₁-DRS têm um ajuste aceitável, mas uma capacidade preditiva semelhante a S₂-DRP. Posto isto, podemos retirar algumas conclusões: os fatores selecionados para a modelação da suscetibilidade representam melhor as características que condicionam a ocorrência de deslizamentos rotacionais profundos de maior magnitude e de deslizamentos translacionais superficiais (S₂-DRP e S₁-DTS). O modelo S₂-DRP, independentemente do grau de ajuste, demonstra uma capacidade preditiva insatisfatória, não por ser um “mau modelo”, no que concerne ao método de avaliação, mas devido à utilização de um inventário de validação composto por deslizamentos que não são influenciados totalmente pelas mesmas condições que influenciam os deslizamentos que compõem o inventário utilizado para treinar o modelo referido. O modelo S₃-DRP encontra-se na mesma situação que o modelo S₂-DRP.

4.1.3. Classificação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente

A classificação permitiu o zonamento da suscetibilidade em termos qualitativos. As diferenças que se observam entre mapas de suscetibilidade (Figura 4.1.7. a 4.1.11.) resultam da combinação dos fatores mais favoráveis para a ocorrência de cada tipo de deslizamento.

O mapa de suscetibilidade classificado do modelo S₁-DRP (Figura 4.1.7.) assinala como áreas mais suscetíveis as vertentes que flanqueiam a depressão de Arruda dos Vinhos, dominadas por depósitos de vertente, margas e argilitos, e margas, unidades litológicas L₂, L₁₀ e L₁₁, respetivamente.

Quanto ao modelo S₂-DRP classificado (Figura 4.1.8.), a sua distribuição espacial é muito semelhante a S₁-DRP, o que atesta, mais uma vez, o peso que os deslizamentos rotacionais profundos de maior magnitude têm nos dois inventários (S₁-DRP e S₂-DRP). Em comparação ao mapa de suscetibilidade derivado de S₁-DRP, verifica-se uma extensão das áreas muito suscetíveis no mapa de suscetibilidade derivado de S₂-DRP, devido à necessidade de incluir uma maior percentagem de área de estudo na classe de

suscetibilidade muito elevada para englobar 50 % do inventário de validação (Figura 4.1.6.).

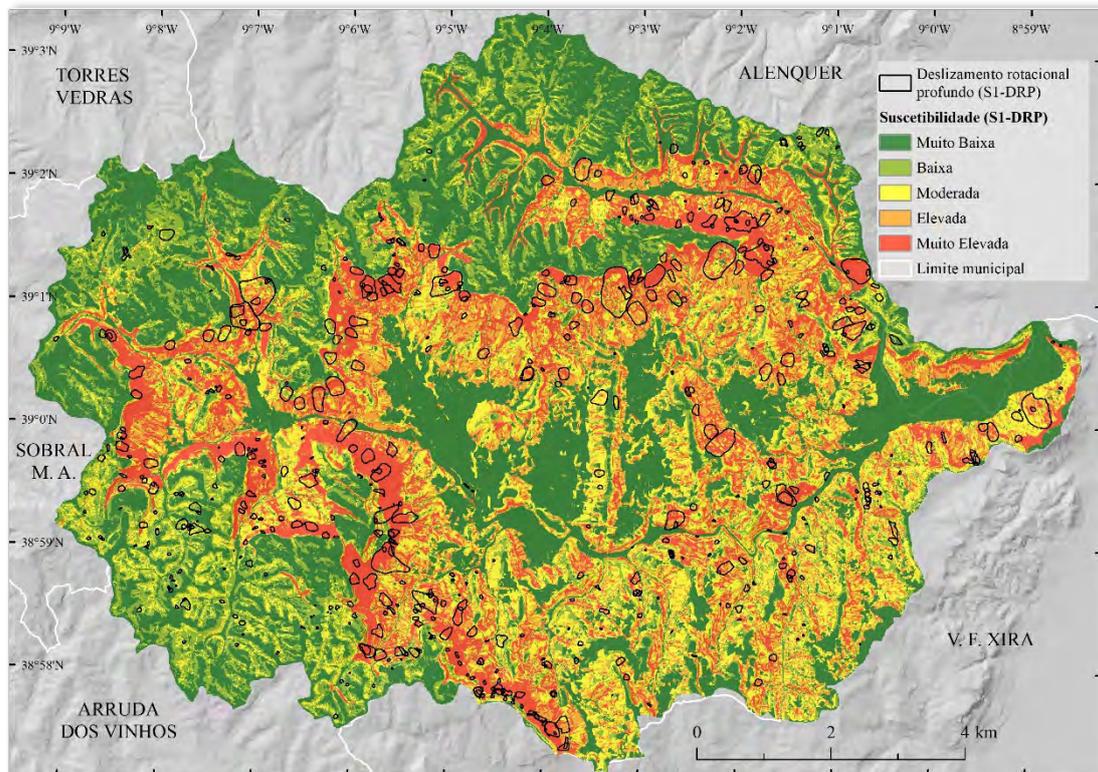


Figura 4.1.7. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S1-DRP.

O mapa de suscetibilidade classificado que derivou do modelo S₃-DRP (Figura 4.1.9.) apresenta uma distribuição da suscetibilidade parcialmente diferente. Ainda é perceptível a caracterização de parte das vertentes que flanqueiam a depressão de Arruda dos Vinhos como áreas mais suscetíveis, principalmente aquelas dominadas pelos depósitos de vertente (L₂) e pelas margas (L₁₁), mas as vertentes expostas a Sul, que drenam para o centro da bacia, e onde predominam margas e argilitos (L₁₀), deixam de ter tanta expressão na definição das áreas mais suscetíveis. Por seu lado, ganham relevância como áreas mais suscetíveis as vertentes situadas na margem direita do Rio Grande da Pipa, com exposição a Nordeste e Este, localizadas ao longo dos vales de orientação geral S-N, que predominam no setor Sul da bacia do RGP. Comparando S₁-DRP com S₂-DRP e S₃-DRP, conclui-se que S₁-DRP é mais semelhante a S₂-DRP do que a S₃-DRP. Isto confirma o controlo que os deslizamentos de maiores dimensões trazem à definição das áreas mais suscetíveis em S₁-DRP e S₂-DRP.

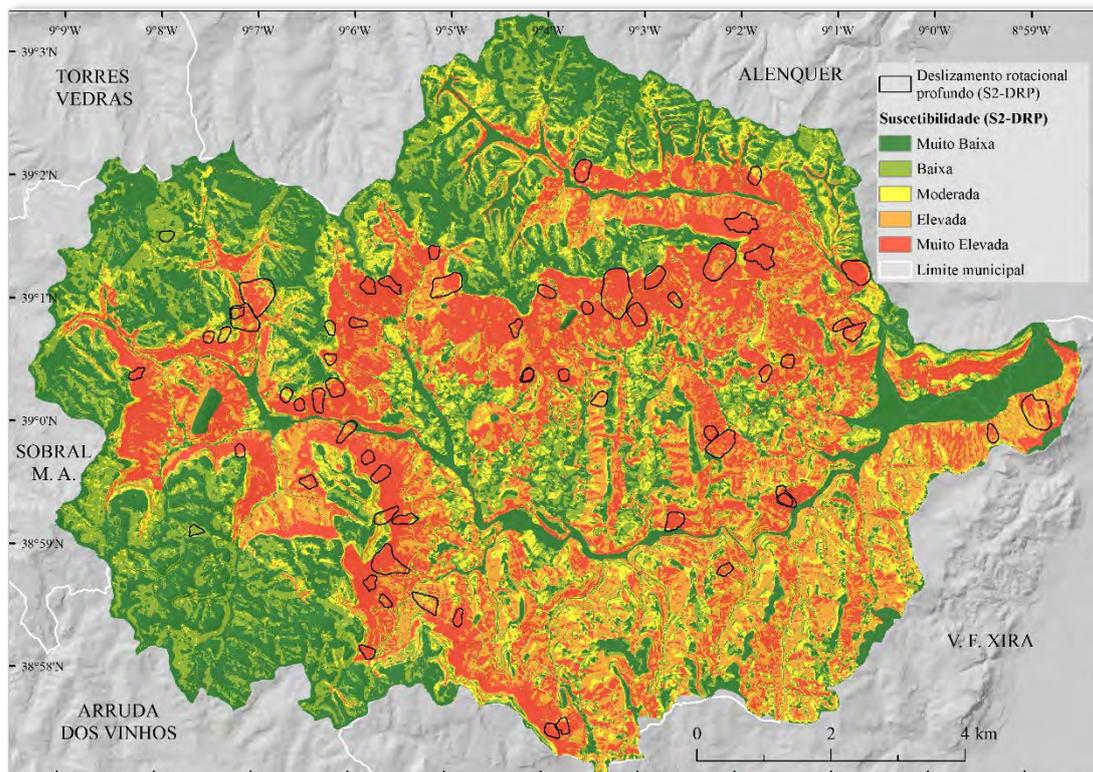


Figura 4.1.8. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S2-DRP.

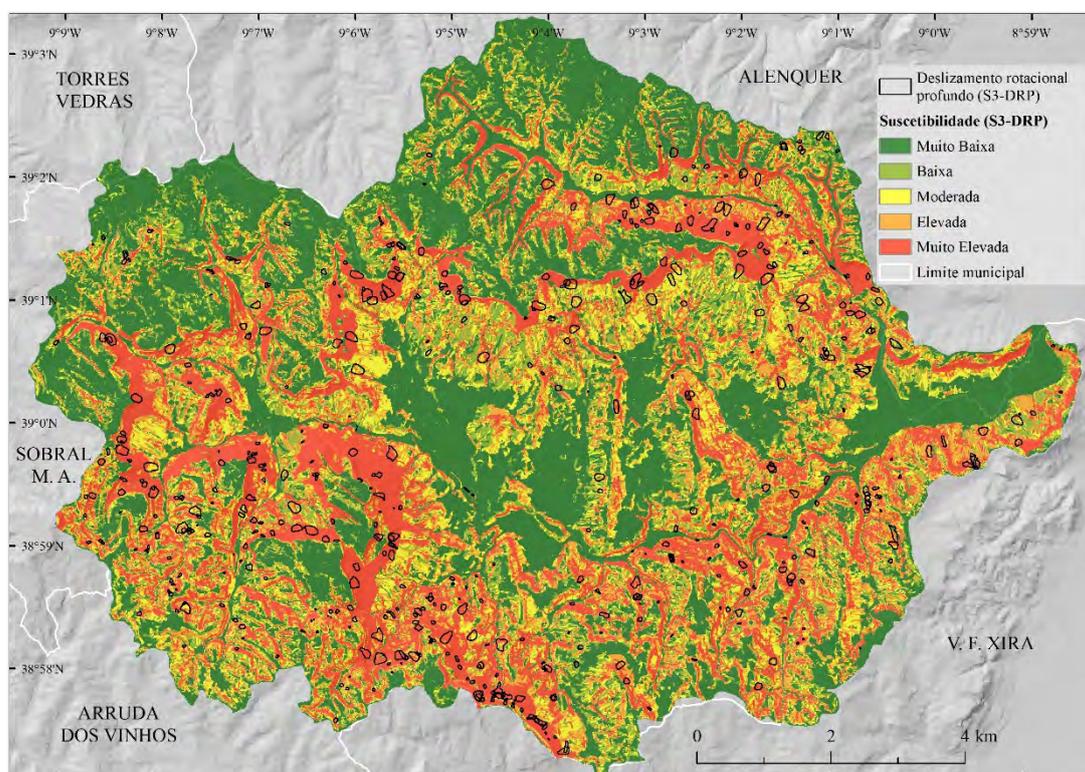


Figura 4.1.9. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S3-DRP.

A distribuição da suscetibilidade do modelo S1-DRS classificado (Figura 4.1.10.) assemelha-se ao modelo S3-DRP. Tal como ocorre com S3-DRP, as áreas mais suscetíveis a deslizamentos rotacionais superficiais encontram-se nas vertentes expostas a Norte da bacia do Rio Grande da Pipa e no setor Sudoeste da área de estudo. A coincidência entre as áreas mais suscetíveis de S3-DRP e as de S1-DRS demonstra que os deslizamentos rotacionais profundos de menor magnitude são condicionados pelos mesmos fatores que condicionam a ocorrência de deslizamentos rotacionais superficiais. Este facto parece resultar também de uma maior aproximação entre ambos os tipos de movimentos de vertente em termos de profundidade de superfície de rotura e magnitude (área deslizada média de 5464 m² e 928 m², respetivamente).

Por fim, a Figura 4.1.11. demonstra que os deslizamentos translacionais superficiais tendem a ocorrer nas áreas mais declivosas da bacia, principalmente naquelas situadas no setor Sudoeste da bacia e nos vales mais encaixados que drenam para os afluentes da Ribeira de Santana de Carnota, no setor Nordeste da bacia do Rio Grande da Pipa.

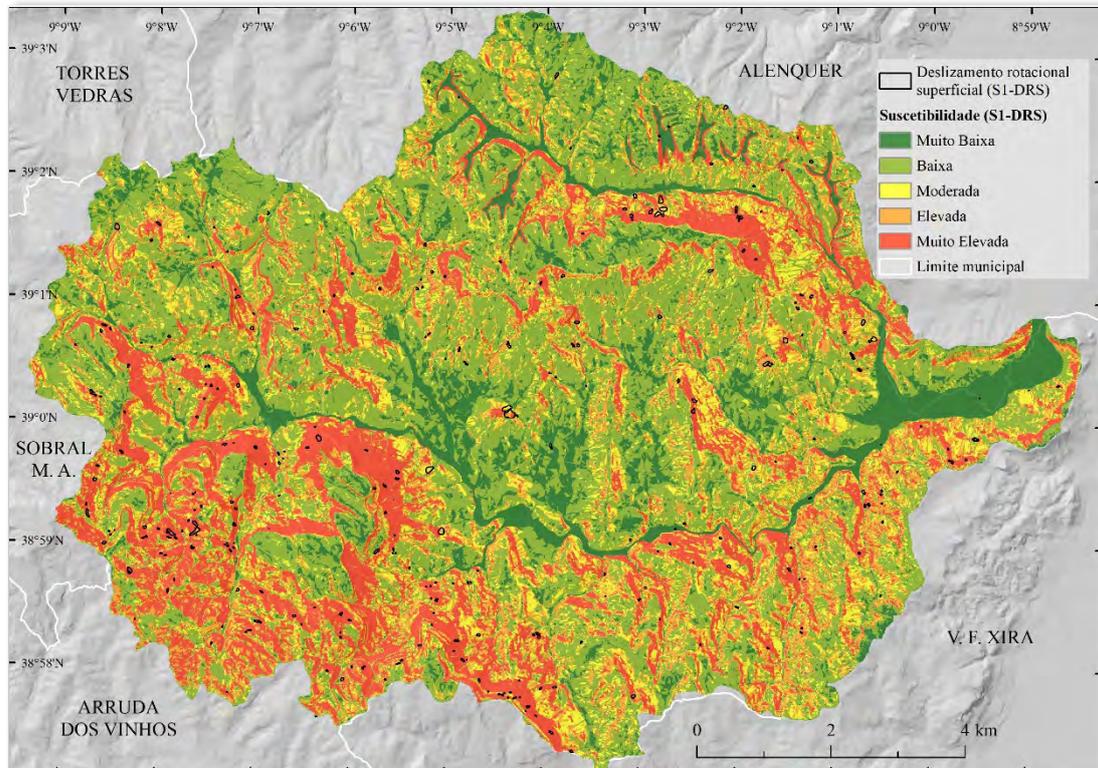


Figura 4.1.10. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos rotacionais superficiais, derivada do modelo S1-DRS.

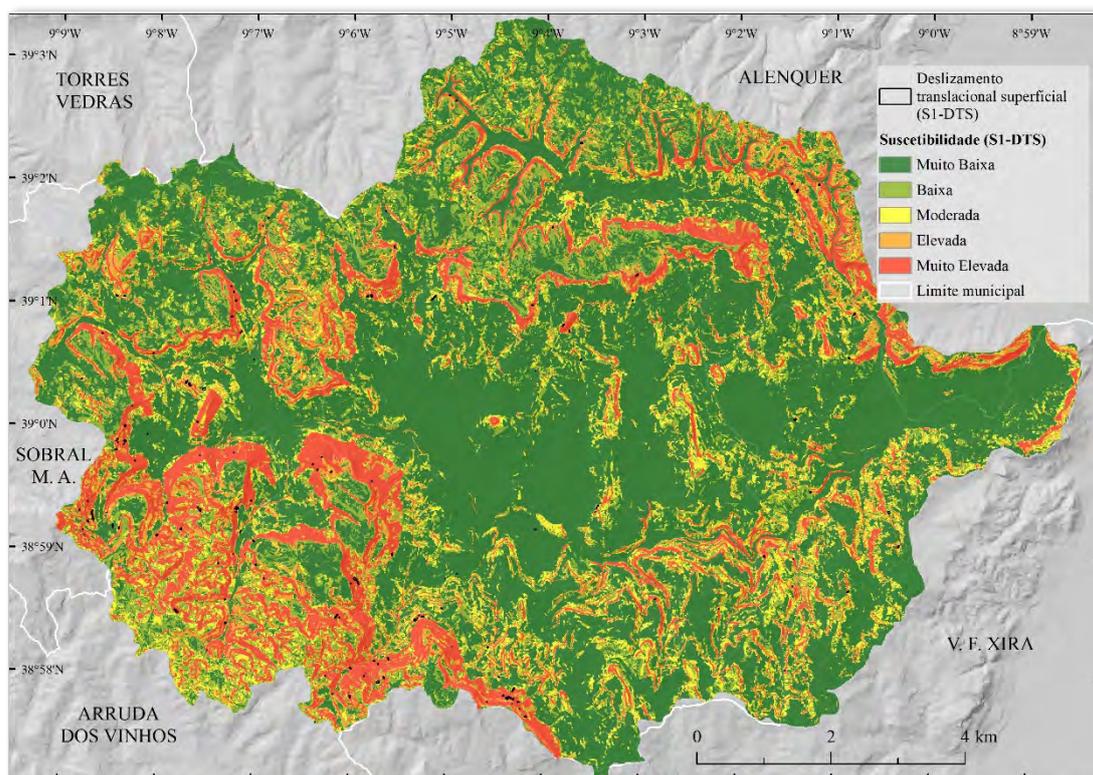


Figura 4.1.11. – Distribuição da suscetibilidade classificada a deslizamentos translacionais superficiais, derivada do modelo S1-DTS.

4.1.4. Análise da concordância espacial dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente

Já se constatou, no sub capítulo 4.1.2., através das curvas de sucesso e de predição e do respetivo cálculo das AAC, que os modelos de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (S₁-DRP, S₂-DRP e S₃-DRP) têm um grau de ajuste semelhante, mas a capacidade preditiva demonstrou diferenças. Essas diferenças estão relacionadas com o inventário que é utilizado para a validação dos resultados, facto que confirmou que deslizamentos da mesma tipologia podem ser condicionados de forma diferente, dependendo da sua magnitude e/ou morfometria. O que se pretende neste sub capítulo é aferir a similaridade entre os modelos (Figuras 4.1.12. a 4.1.14.), de forma a comparar quantitativamente a distribuição das diferentes classes de suscetibilidade. Os indicadores mais importantes a reter são o *kappa*, o *kappa location* e a concordância espacial (Tabela 4.3.). O *kappa histogram* é importante enquanto parte

integrante do *kappa*, mas não tanto enquanto indicador independente, visto que apenas mede o grau de similaridade entre cada classe quanto à quantidade de unidades de terreno (células) que estas apresentam.

Tabela 4.3. – Níveis de concordância avaliados para cada par de modelos de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos.

| Modelos confrontados | Indicador | Suscetibilidade | | | | | Total |
|----------------------|-----------------------|-----------------|-------|----------|---------|---------------|-------|
| | | Muito Baixa | Baixa | Moderada | Elevada | Muito Elevada | |
| S1-DRP e S2-DRP | Kappa | 0,72 | 0,41 | 0,20 | 0,19 | 0,67 | 0,47 |
| | Kappa histogram | 0,85 | 0,92 | 0,73 | 0,80 | 0,81 | 0,83 |
| | Kappa location | 0,84 | 0,45 | 0,27 | 0,23 | 0,82 | 0,57 |
| | Concordância espacial | - | - | - | - | - | 58,4% |
| S1-DRP e S3-DRP | Kappa | 0,81 | 0,17 | 0,13 | 0,13 | 0,59 | 0,44 |
| | Kappa histogram | 0,95 | 0,80 | 0,77 | 0,88 | 0,82 | 0,86 |
| | Kappa location | 0,85 | 0,22 | 0,17 | 0,15 | 0,73 | 0,51 |
| | Concordância espacial | - | - | - | - | - | 56,3% |
| S2-DRP e S3-DRP | Kappa | 0,55 | 0,09 | 0,01 | 0,17 | 0,35 | 0,28 |
| | Kappa histogram | 0,80 | 0,73 | 0,95 | 0,91 | 1,00 | 0,88 |
| | Kappa location | 0,68 | 0,12 | 0,01 | 0,19 | 0,35 | 0,32 |
| | Concordância espacial | - | - | - | - | - | 43,8% |

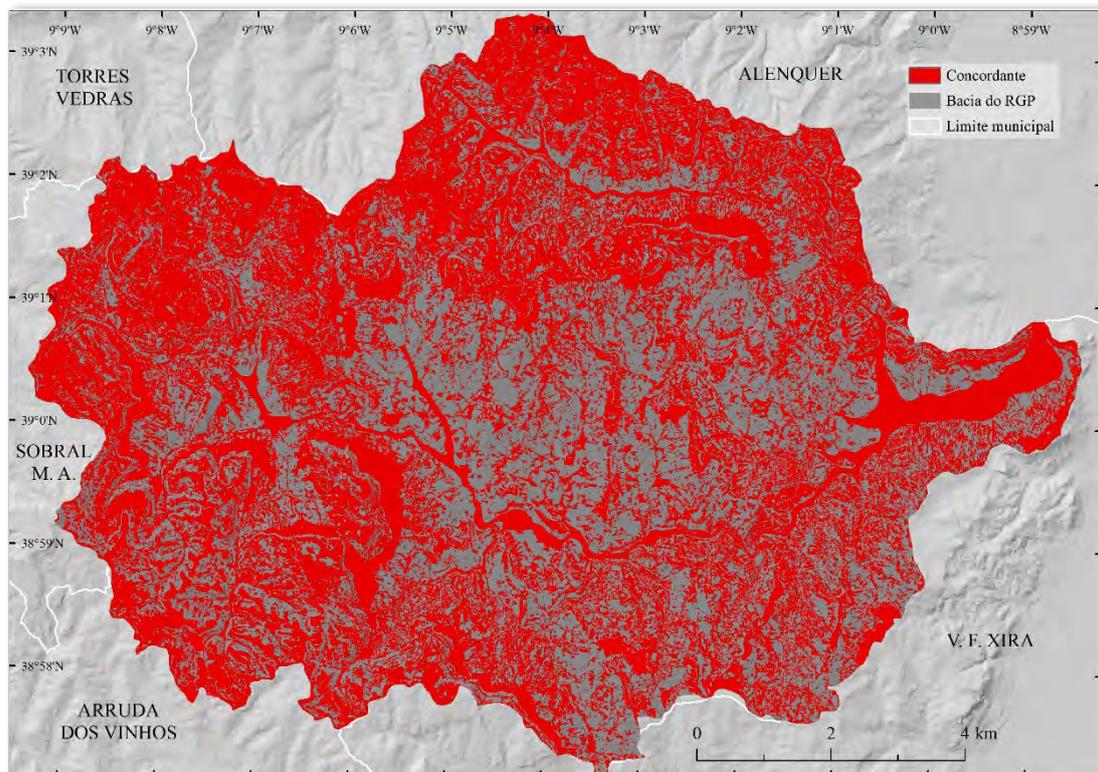


Figura 4.1.12. – Concordância espacial entre os mapas de suscetibilidade classificados, derivados dos modelos S1-DRP e S2-DRP.

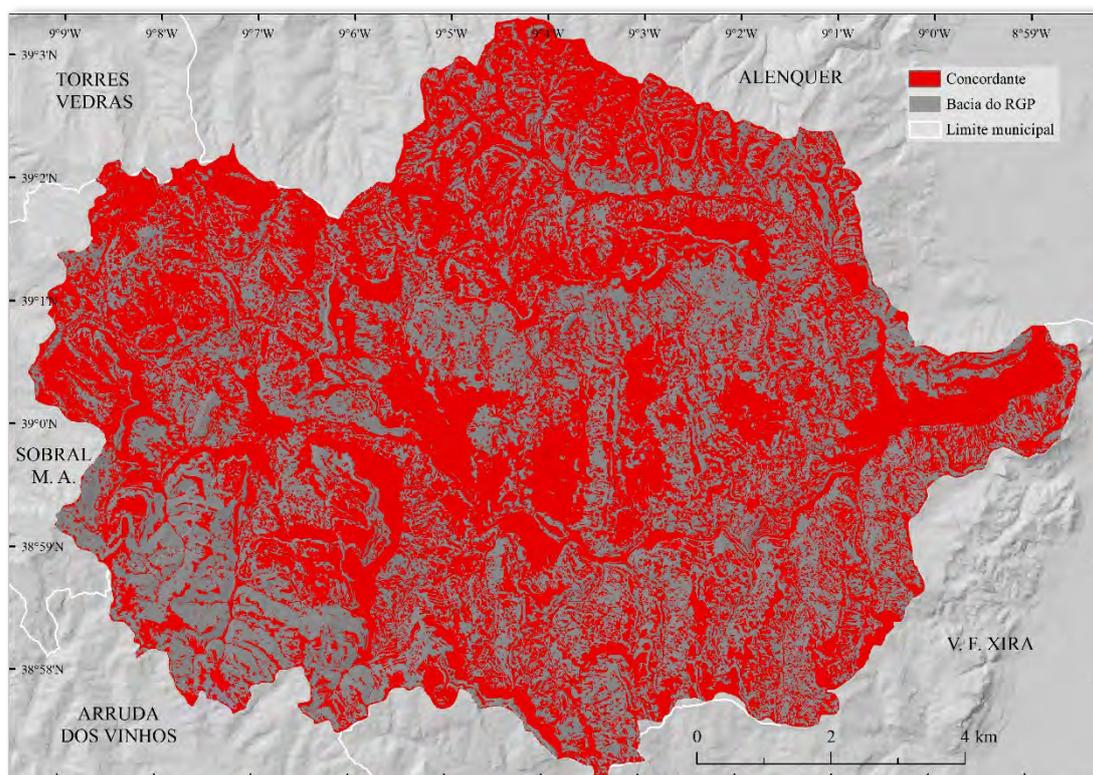


Figura 4.1.13. – Concordância espacial entre os mapas de suscetibilidade classificados, derivados dos modelos S1-DRP e S3-DRP.

De forma geral, comparando S2-DRP com S1-DRP e S3-DRP com S1-DRP, constatamos que os níveis de similaridade são idênticos: respectivamente, 58 % e 56 % de concordância espacial, 0,47 e 0,44 de *kappa* e 0,57 e 0,51 de *kappa location*, o que pode ser interpretado como uma similaridade fraca a moderada, considerando, respectivamente, a classificação qualitativa de McHugh (2012), mais conservadora, e a de Landis e Koch (1977), mais otimista. Os modelos S2-DRP e S3-DRP, quando confrontados entre si, demonstram uma concordância espacial de 44 %, um *kappa* de 0,28 e um *kappa location* de 0,32. Estes resultados eram expectáveis, dadas as diferenças que já tinham sido constatadas nos subcapítulos 4.1.1., 4.1.2. e 4.1.3..

Da leitura da Tabela 4.3. é ainda possível perceber que, analisando o grau de similaridade por classe de suscetibilidade, S1-DRP e S2-DRP têm uma similaridade forte a quase perfeita na classe de suscetibilidade Muito Elevada. Supreendentemente, a similaridade de S1-DRP e S2-DRP na classe de suscetibilidade Elevada é mínima a razoável. Estes resultados demonstram que a utilização de inventários de movimentos

de vertente com magnitude distinta pode produzir diferenças significativas no zonamento da suscetibilidade a movimentos de vertente.

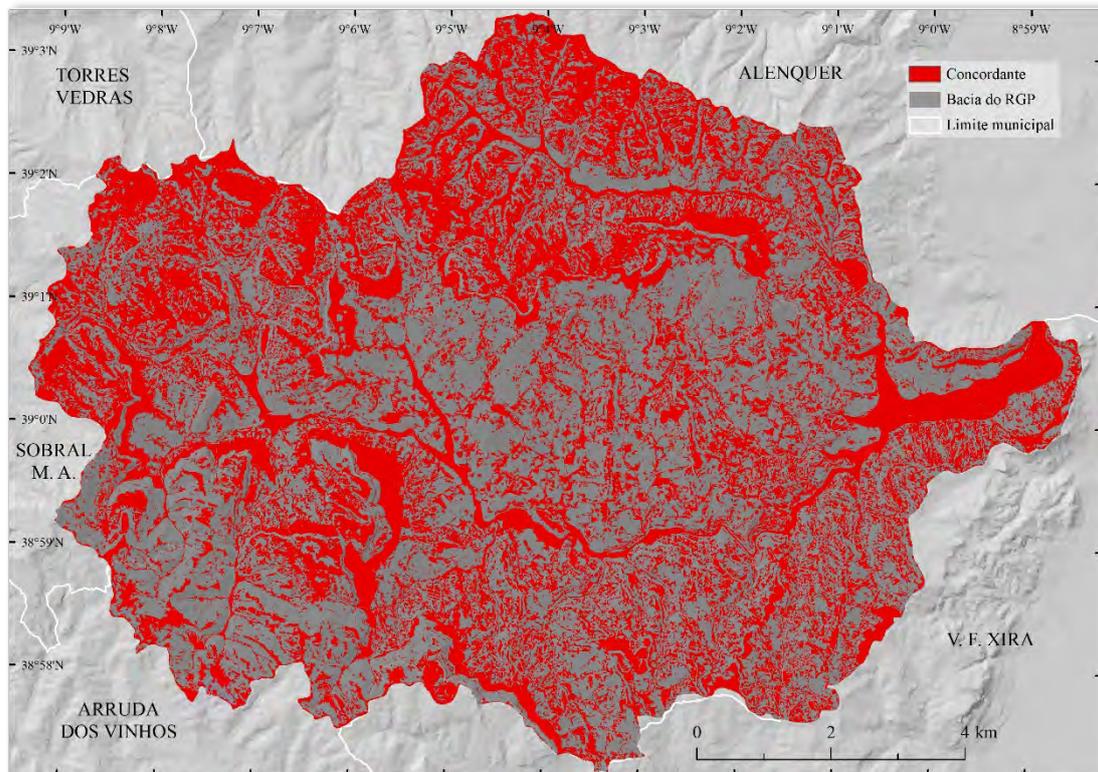


Figura 4.1.14. – Concordância espacial entre os mapas de suscetibilidade classificados, derivados dos modelos S2-DRP e S3-DRP.

4.1.5. Hierarquização das sub-bacias

As sub-bacias foram submetidas a um processo metodológico que permite a sua hierarquização de acordo com a sua suscetibilidade a diferentes tipos de movimentos de vertente. As sub-bacias imediatamente a montante de Arruda dos Vinhos, são as que apresentam maior suscetibilidade, enquanto que no centro da área de estudo, as sub-bacias de menor dimensão e associadas a relevo menos acidentado, evidenciam menor suscetibilidade (Figura 4.1.15.). A sub-bacia de Salema é a mais importante do ponto de vista da suscetibilidade a deslizamentos. Como é a única a cumprir ambos os critérios (mencionados anteriormente no sub-capítulo 3.1.3.), nas três tipologias de instabilidade, é também a única classificada em primeiro na hierarquia de suscetibilidade. Seguem-se as sub-bacias de Casal Vale Flores e Pé do Monte-Céu (2ª

ordem), Zibreira (3ª ordem), Monfalim (4ª ordem), Chapinheira-Martim Afonso, Casal do Ouro, Quintas e São Sebastião (5ª ordem), Cachoeiras, Laje e Santana da Carnota Sul (6ª ordem) e Rio Grande da Pipa e Louriceira (7ª ordem). As restantes sub-bacias (8ª ordem) não estão enquadradas em nenhum dos critérios.

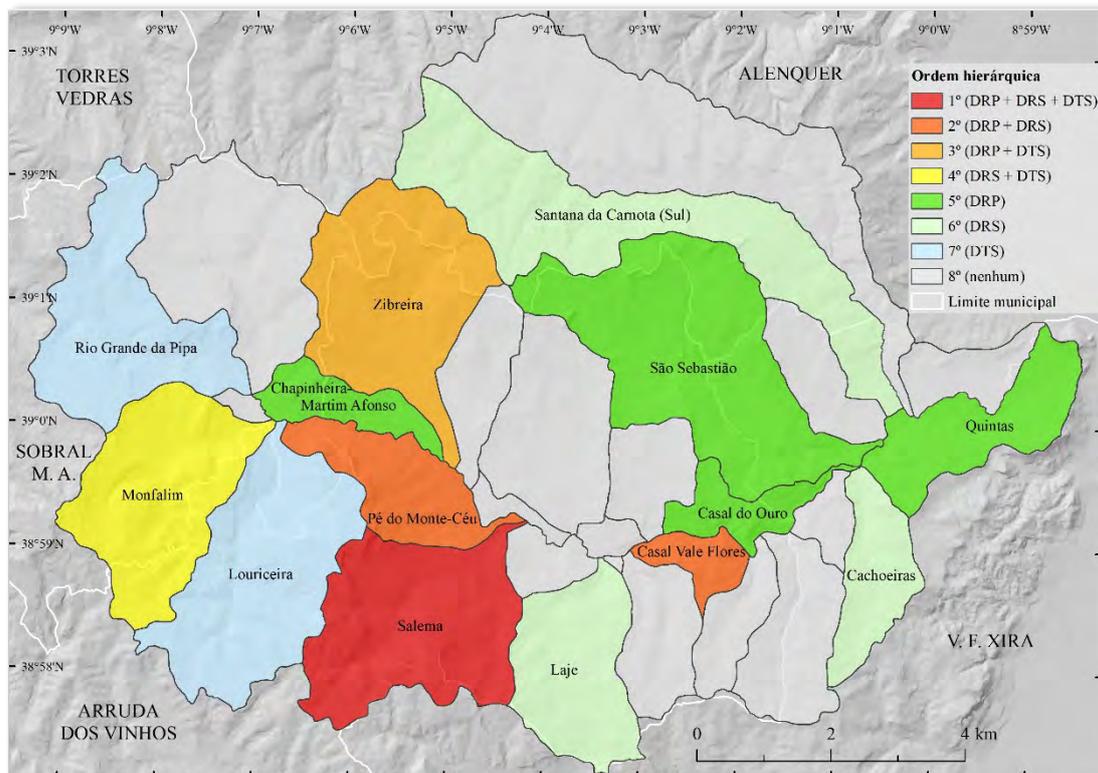


Figura 4.1.15. – Hierarquização das sub-bacias de acordo com a suscetibilidade a deslizamentos.

4.2. Avaliação das áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente

As áreas críticas de suscetibilidade (*susceptibility hotspots*) ocupam 1,75 km² da bacia do Rio Grande da Pipa, sendo que 1 km² (57 %) corresponde a áreas deslizadas, de acordo com o inventário utilizado para treinar o modelo de suscetibilidade S₁-DRP. Estas áreas críticas delimitam áreas naturalmente suscetíveis a deslizamentos rotacionais profundos e com uma elevada concentração de movimentos, ou áreas com menor concentração de movimentos, mas associadas à presença de deslizamentos rotacionais profundos de maior magnitude (Figura 4.2.1.). Algumas das áreas críticas de suscetibilidade localizam-se em áreas onde ocorreram alguns dos maiores deslizamentos em termos de área deslizada, como é o caso daqueles situados em

Curvaceira de Baixo (ACrS₁), a Norte de Casal do Monteiro (ACrS₂), a Norte de Martim Afonso (ACrS₄) ou em Quinta da Capelã (ACrS₆). A esmagadora maioria das áreas críticas de suscetibilidade (82 %) ocupa vertentes com declives moderados, que variam entre os 5° e os 15° (classes D₂ e D₃) contrastando ligeiramente com os resultados apresentados anteriormente na Tabela 4.1., que identificava as vertentes mais declivosas com maior predisposição para a ocorrência de deslizamentos rotacionais profundos. Devido à sua dimensão, parte significativa da deformação destes movimentos mais profundos ocorre já sobre as margas e argilitos da Formação de Abadia (L10), que, do ponto de vista topográfico, por serem rochas mais brandas, dão origem a vertentes de declives moderados a pouco acentuados.

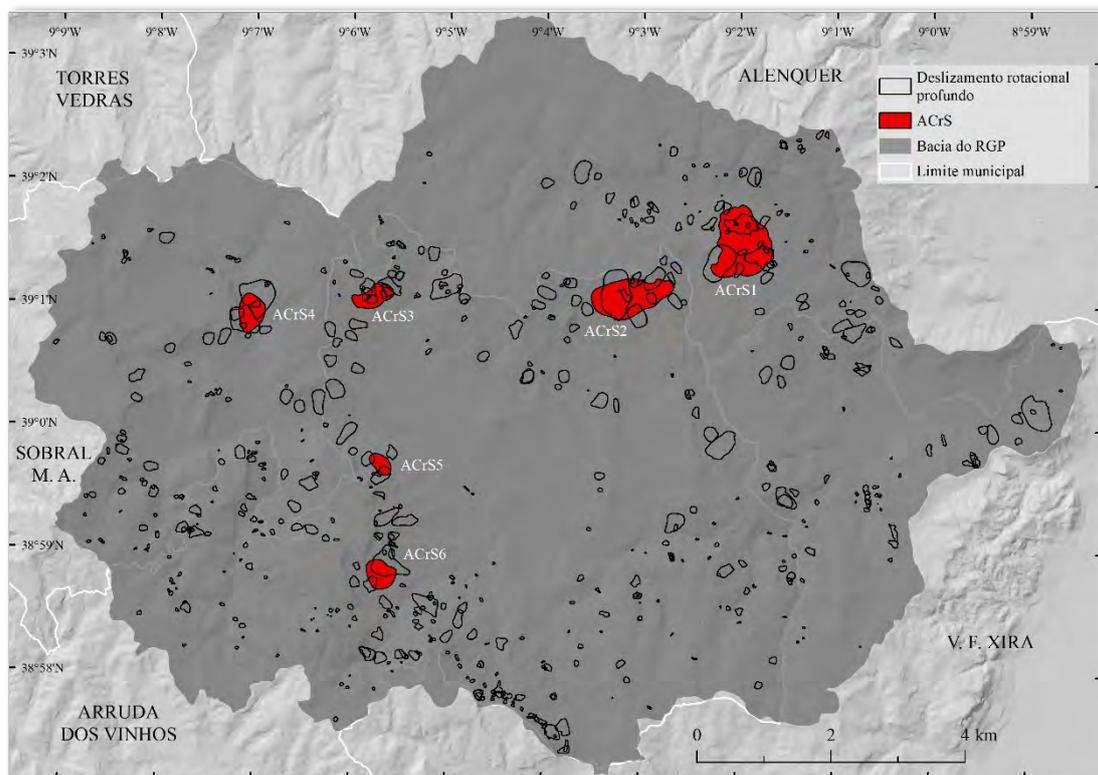


Figura 4.2.1. – Distribuição espacial das áreas críticas de suscetibilidade (ACrS) a deslizamentos rotacionais profundos.

Quanto à orientação, as áreas críticas de suscetibilidade estão localizadas em vertentes orientadas sobretudo a Este, Sudeste e Sul, que é a exposição predominante das vertentes da margem esquerda do Rio Grande da Pipa. No caso do perfil planiforme e do TPI, as áreas críticas de suscetibilidade ocorrem sobretudo em áreas planas, o que pode refletir o impacto que a inclusão das áreas de acumulação no inventário tem para

este tipo de modelação espacial. Efetivamente, para parte significativa destes deslizamentos rotacionais que ocorrem nesta unidade, a deformação fica maioritariamente contida na área definida pela superfície de rotura.

4.3. Avaliação da exposição a movimentos de vertente

4.3.1. Avaliação dos edifícios e da população exposta a movimentos de vertente

A análise que se segue pretende complementar o que já foi escrito no subcapítulo 2.4. deste trabalho, sobre a componente social e demográfica da bacia do Rio Grande da Pipa.



Figura 4.3.1. – Exemplo de dois edifícios residenciais construídos entre 1995 e 2011 sobre um antigo deslizamento rotacional profundo, desencadeado em 1989.

Cruzando a distribuição espacial do edificado em 1995 (ver subcapítulo 3.3.1.1.) com o inventário de ocorrências de deslizamentos rotacionais profundos na bacia do Rio Grande da Pipa, é possível verificar que entre 1995 e 2011 foram construídos 25 edifícios em áreas com histórico de ocorrência de movimentos de vertente, representando 1,9 % dos edifícios construídos nesse período. Entre 2011 e 2018, contabilizaram-se 6 novos

edifícios em áreas anteriormente instabilizadas, mas a proporção relativamente aos edifícios construídos durante este período aumentou para 2,7 %.

Pretendeu-se, ainda, quantificar os edifícios construídos depois da ocorrência de um evento de instabilidade; contudo, como quer a data de construção dos edifícios, quer a data de ocorrência de grande parte dos movimentos de vertente deste inventário não é absoluta, mas sim relativa, não foi possível fazer esse exercício para toda a base de dados, pelo que só é possível identificar os edifícios que foram construídos sobre áreas deslizadas se a construção foi posterior ao evento de instabilidade, ou seja, a deslizamentos desencadeados antes de 1995, no caso dos edifícios construídos entre 1995 e 2011, ou a deslizamentos posteriores a 1995 e anteriores a 2011, no caso dos edifícios construídos entre 2011 e 2018. Assim, dos 25 edifícios construídos entre 1995 e 2011, sobre áreas com histórico de instabilidade geomorfológica, 14 foram construídos após a ocorrência da instabilidade. Dos 6 edifícios construídos entre 2011 e 2018, na mesma situação que os primeiros, 2 foram construídos depois da instabilidade.

Cruzando a distribuição espacial do edificado em 1995, 2011 e 2018 com o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (Figura 4.3.2.), sem considerar os dados de população, observa-se que, em 2018, cerca de 20 % dos edifícios (1555) localizavam-se nas classes de suscetibilidade Elevada e Muito Elevada. Se considerarmos apenas os que surgiram entre 1995 e 2018, foram construídos 381 edifícios em áreas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada, o que representa 25 % de todos os edifícios construídos nesse período.

Quanto à população residente, os edifícios que albergam cada um dos quatro grupos etários estudados têm a mesma distribuição pelas cinco classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos, sendo que, em ambos os grupos, 20 % dos edifícios estão expostos (Figura 4.3.3.). São 1555 os edifícios com população residente que se encontram expostos a deslizamentos rotacionais profundos, na bacia do Rio Grande da Pipa. Destes 1555, 770 enquadram-se em áreas de suscetibilidade Elevada, onde habitam 1540 pessoas, e 785 em áreas de suscetibilidade Muito Elevada, onde residem 1493 habitantes. Quanto à população residente com idade igual ou inferior a 9 anos, esta distribui-se, em termos de exposição, por 580 edifícios localizados em áreas

de suscetibilidade Elevada, e por 557 edifícios localizados em áreas de suscetibilidade Muito Elevada, onde residem 190 e 173 crianças, respetivamente.

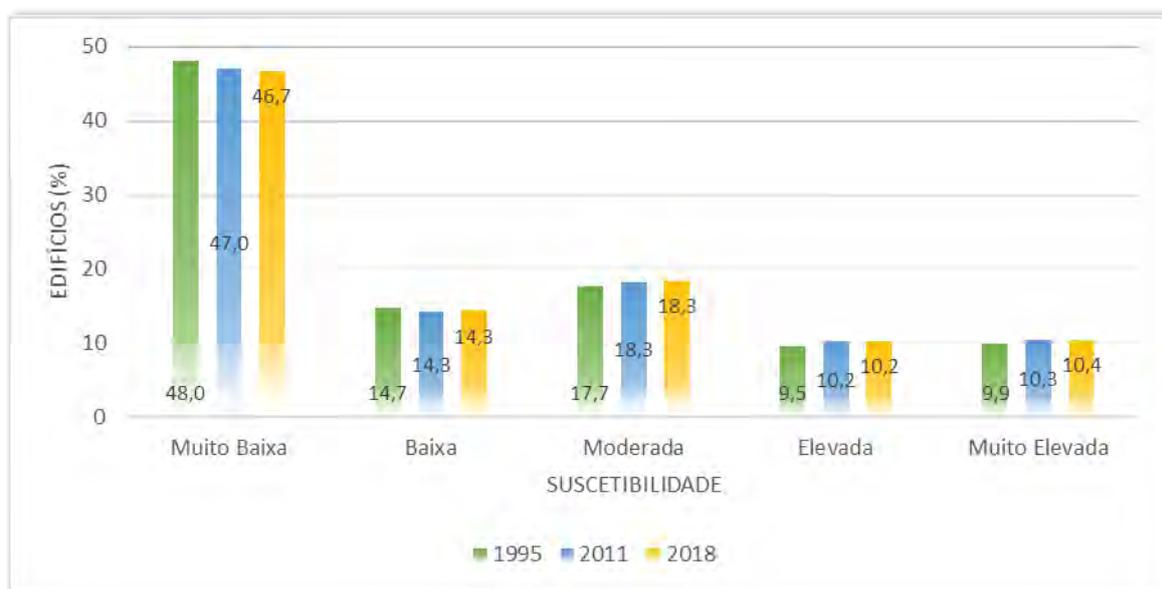


Figura 4.3.2. – Percentagem de edifícios, relativos aos anos de 1995, 2011 e 2018, localizados nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S1-DRP.

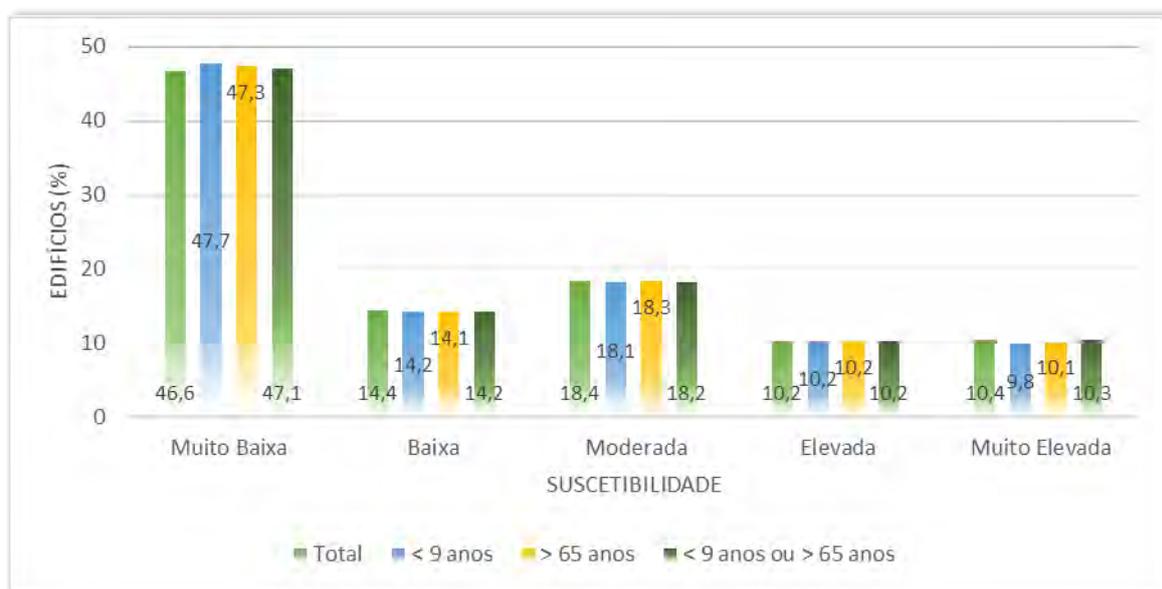


Figura 4.3.3. – Percentagem de edifícios com população residente, organizada por estrutura etária, localizados nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos, derivada do modelo S1-DRP.

Dos edifícios com população residente de idade igual ou superior a 65 anos, 661 estão em áreas de suscetibilidade Elevada, onde residem 324 idosos. Nas áreas de suscetibilidade Muito Elevada encontram-se 655 edifícios, onde habitam 326 pessoas

de idade igual ou superior a 65 anos. Relativamente aos edifícios com população residente de idade igual ou inferior a 9 anos ou idade igual ou superior a 65 anos, contabilizam-se 687 edifícios em áreas de suscetibilidade Elevada, nos quais residem 515 pessoas enquadradas nessas faixas etárias. Nas áreas de suscetibilidade Muito Elevada estão localizados 699 edifícios, com 498 residentes de idade igual ou inferior a 9 anos ou idade igual ou superior a 65 anos.

A distribuição espacial dos edifícios com população residente pelas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (S₁-DRP) também é muito semelhante entre as faixas etárias consideradas (Figuras 4.3.4. a 4.3.7.).

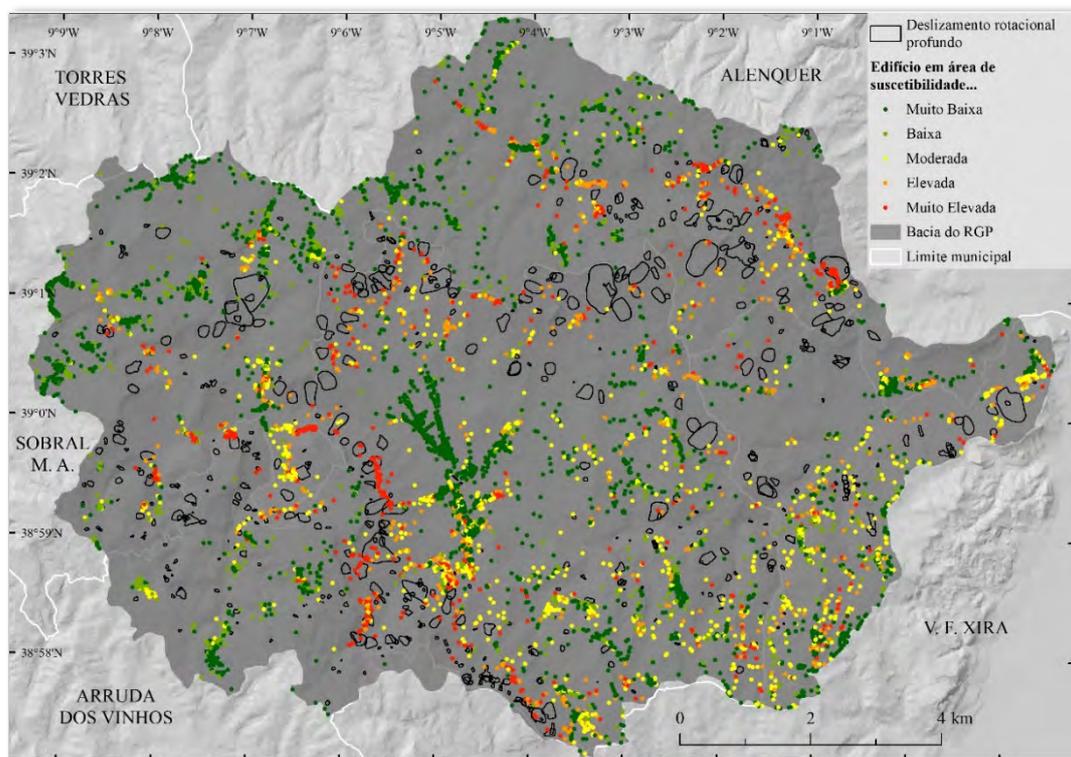


Figura 4.3.4. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos.

De forma geral, os edifícios com população residente expostos às classes de suscetibilidade Elevada e Muito Elevada a deslizamentos rotacionais profundos localizam-se (i) ao longo das margens da Ribeira de Santana da Carnota, mas mais concretamente em redor de Refugidos, e (ii) no alinhamento de aglomerados populacionais que se localizam no sopé das vertentes a Oeste de Arruda dos Vinhos:

Paço, Pé do Monte, Giesteira, Quinta da Capelã e Mata (toponímia representada na Figura 2.4.).

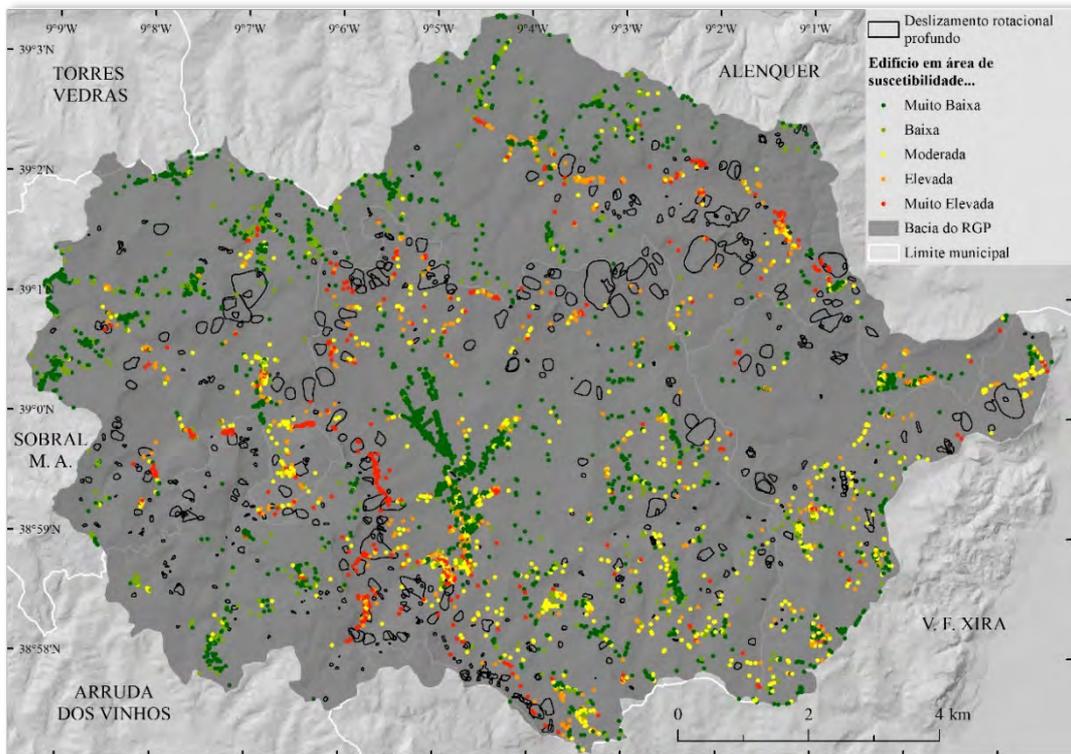


Figura 4.3.5. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente de idade igual ou inferior a 9 anos, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos.

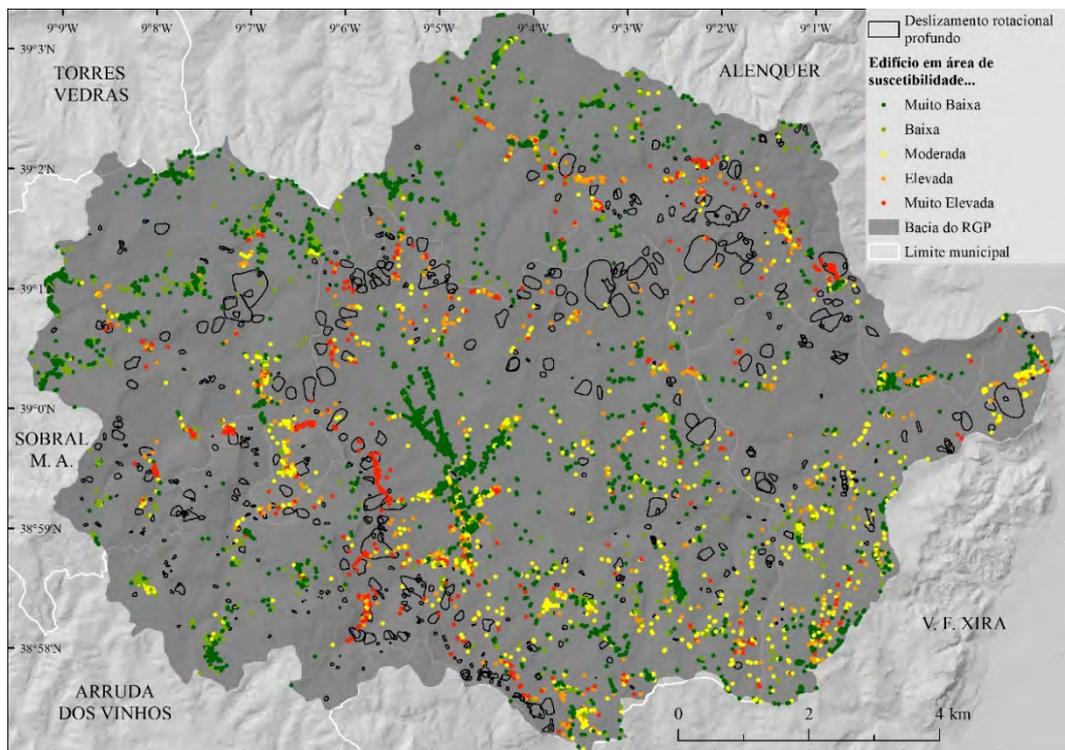


Figura 4.3.6. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente de idade igual ou superior a 65 anos, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos.

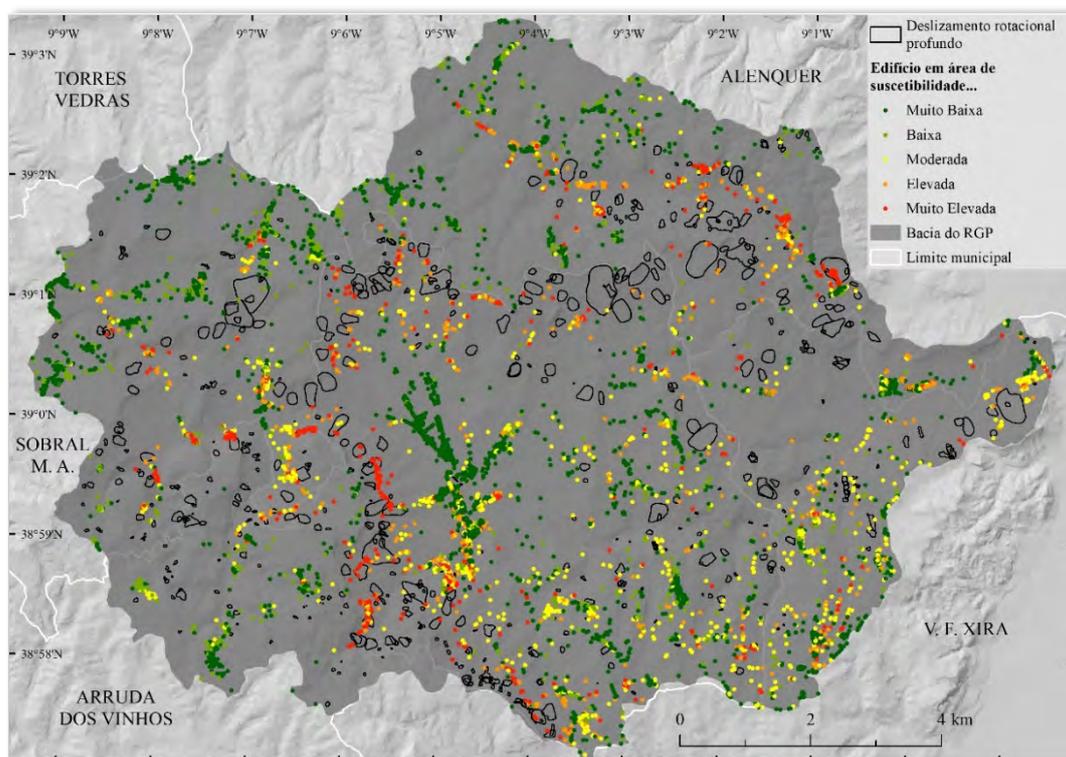


Figura 4.3.7. – Distribuição espacial dos edifícios com população residente de idade igual ou inferior a 9 anos ou de idade igual ou superior a 65 anos, classificados de acordo com o nível de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos.

4.3.2. Avaliação dos Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis e da rede viária exposta a movimentos de vertente

Em termos relativos, se considerarmos as classes de suscetibilidade Elevada e Muito Elevada, os Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis (EEEVS) encontram-se consideravelmente expostos a qualquer tipo de deslizamentos (Tabelas 4.4. a 4.6.).

Considerando a área total dos EEEVS, estes estão principalmente expostos a deslizamentos rotacionais profundos (DRP) e a deslizamentos rotacionais superficiais (DRS), com, respetivamente, 8 % e 6 % de ocupação em áreas de suscetibilidade Elevada e 4 % de ocupação em áreas de suscetibilidade Muito Elevada a ambos. A exposição dos EEEVS a deslizamentos translacionais superficiais (DTS) é menor, com 2

% e 1 % de ocupação em áreas de suscetibilidade Elevada e Muito Elevada, respetivamente.

Considerando a exposição a DRP (Tabela 4.4.), encontram-se expostas as Áreas de Serviço (63,2 %), a Área SEVESO (8,7 %), a Câmara Municipal (4 %), os Complexos Industriais/Armazéns/Pavilhões (12,1 %), as Escolas (15,7 %), as Igrejas/Capelas (9,1 %) e os Supermercados (< 1 %).

Tabela 4.4. – Distribuição dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (S1-DRP).

| Tipo | n | DRP | | | | | | | | | | Total |
|--------------------------------------|----|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|--------|
| | | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | | Elevada | | Muito Elevada | | |
| | | Área (m ²) | Área (%) | |
| Área de Serviço | 3 | 125 | 26,3 | 0 | 0 | 50 | 10,5 | 100 | 21,1 | 200 | 42,1 | 475 |
| Área SEVESO | 1 | 525 | 91,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 8,7 | 0 | 0 | 575 |
| Câmara Municipal | 1 | 350 | 56 | 0 | 0 | 250 | 40 | 25 | 4 | 0 | 0 | 625 |
| Complexo Industrial/Armazém/Pavilhão | 91 | 408375 | 70,9 | 44350 | 7,7 | 53600 | 9,3 | 45225 | 7,8 | 24825 | 4,3 | 576375 |
| Componente de Rede Eléctrica | 21 | 1700 | 90,7 | 175 | 9,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1875 |
| Escola | 23 | 13775 | 53,9 | 1800 | 7 | 6000 | 23,5 | 3825 | 15 | 175 | 0,7 | 25575 |
| Hospital/Centro de Saúde | 2 | 3275 | 97,8 | 0 | 0 | 75 | 2,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3350 |
| Igreja/Capela | 29 | 3050 | 68,9 | 750 | 16,9 | 225 | 5,1 | 300 | 6,8 | 100 | 2,3 | 4425 |
| Quartel | 4 | 1425 | 96,6 | 50 | 3,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1475 |
| Serviço Municipal | 2 | 250 | 8,1 | 1575 | 51,2 | 1250 | 40,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3075 |
| Supermercado | 5 | 9675 | 89,4 | 0 | 0 | 1075 | 9,9 | 75 | 0,7 | 0 | 0 | 10825 |

No caso da exposição a DRS e DTS (Tabelas 4.5. e 4.6.), todos os EEEVS referidos anteriormente apresentam um menor grau de exposição, em termos percentuais.

Tabela 4.5. – Distribuição dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais superficiais (S1-DRS).

| Tipo | n | DRS | | | | | | | | | | Total |
|--------------------------------------|----|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|--------|
| | | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | | Elevada | | Muito Elevada | | |
| | | Área (m ²) | Área (%) | |
| Área de Serviço | 3 | 0 | 0 | 125 | 26,3 | 75 | 15,8 | 200 | 42,1 | 75 | 15,8 | 475 |
| Área SEVESO | 1 | 0 | 0 | 525 | 91,3 | 50 | 8,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 575 |
| Câmara Municipal | 1 | 0 | 0 | 350 | 56 | 275 | 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 625 |
| Complexo Industrial/Armazém/Pavilhão | 91 | 180825 | 31,4 | 293425 | 50,9 | 46875 | 8,1 | 32875 | 5,7 | 22375 | 3,9 | 576375 |
| Componente de Rede Eléctrica | 21 | 1025 | 56 | 450 | 25 | 50 | 3 | 50 | 3 | 250 | 14 | 1825 |
| Escola | 23 | 3375 | 13,2 | 20725 | 81 | 1225 | 4,8 | 125 | 0,5 | 125 | 0,5 | 25575 |
| Hospital/Centro de Saúde | 2 | 2100 | 62,7 | 1175 | 35,1 | 75 | 2,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3350 |
| Igreja/Capela | 29 | 525 | 11,9 | 3075 | 69,5 | 375 | 8,5 | 275 | 6,2 | 175 | 4 | 4425 |
| Quartel | 4 | 1475 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1475 |
| Serviço Municipal | 2 | 0 | 0 | 825 | 26,8 | 275 | 8,9 | 1450 | 47,2 | 525 | 17,1 | 3075 |
| Supermercado | 5 | 5150 | 47,6 | 5675 | 52,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10825 |

Além disso, a Área SEVESO, a Câmara Municipal e os Supermercados deixam de estar expostos, mas acrescentam-se os Componentes de Rede Eléctrica (17 % e 20 %, respetivamente) e os Serviços Municipais (64,3 % e 50,4 %, respetivamente). A afetação de cada um destes EEEVS trará diferentes consequências. A afetação das

Áreas de Serviço, da Área SEVESO e dos Complexos Industriais/Armazéns/Pavilhões, além do prejuízo económico, pode trazer problemas ambientais a nível local, relacionados com a contaminação do solo e das águas. A Câmara Municipal, enquanto sede da administração do município, e os restantes EEEVS expostos (Componente de Rede Elétrica, Escola, Igreja/Capela, Serviço Municipal e Supermercado), oferecem capacidade de suporte à população local. Os únicos EEEVS que não se encontram expostos a nenhum tipo de movimento de vertente (classes de suscetibilidade muito elevada e elevada) são o Hospital/Centro de Saúde e o Quartel dos Bombeiros, que são, provavelmente, os EEEVS mais importantes para a resposta à emergência. O Hospital/Centro de Saúde oferece cuidados de saúde à população afetada; o Quartel, por outro lado, permite o estacionamento de viaturas para a resposta à emergência e inclui áreas de comando, de administração e gestão de emergência, bem como áreas para alojamento do corpo de bombeiros.

Tabela 4.6. – Distribuição dos Elementos Expostos Estratégicos Vitais e/ou Sensíveis nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS).

| Tipo | n | DTS | | | | | | | | | | Total |
|--------------------------------------|----|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|--------|
| | | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | | Elevada | | Muito Elevada | | |
| | | Área (m ²) | Área (%) | |
| Área de Serviço | 3 | 400 | 84,2 | 25 | 5,3 | 25 | 5,3 | 25 | 5,3 | 0 | 0 | 475 |
| Área SEVESO | 1 | 575 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 575 |
| Câmara Municipal | 1 | 625 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 625 |
| Complexo Industrial/Armazém/Pavilhão | 91 | 472950 | 82,1 | 51150 | 8,9 | 32650 | 5,7 | 13300 | 2,3 | 6325 | 1,1 | 576375 |
| Componente de Rede Elétrica | 21 | 1275 | 68 | 175 | 9 | 50 | 3 | 50 | 3 | 325 | 17 | 1875 |
| Escola | 23 | 24675 | 96,5 | 450 | 1,8 | 300 | 1,2 | 150 | 0,6 | 0 | 0 | 25575 |
| Hospital/Centro de Saúde | 2 | 3350 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3350 |
| Igreja/Capela | 29 | 2825 | 63,8 | 775 | 17,5 | 475 | 10,7 | 125 | 2,8 | 225 | 5,1 | 4425 |
| Quartel | 4 | 1475 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1475 |
| Serviço Municipal | 2 | 775 | 25,2 | 225 | 7,3 | 525 | 17,1 | 1000 | 32,5 | 550 | 17,9 | 3075 |
| Supermercado | 5 | 10825 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10825 |

Considerando a extensão total da rede viária, 29 % (34,6 km), 27 % (30,5 km) e 25 % (17,6 km) dos troços estão expostos a DRP, DRS e DTS, respetivamente. Estes troços situam-se principalmente (i) na parte Sul da bacia, na ligação da vila de Arruda dos Vinhos ao município de Vila Franca de Xira; (ii) na parte Sudoeste do município de Arruda dos Vinhos; (iii) na parte Nordeste da bacia, onde a rede viária faz a ligação do centro da bacia ao setor Norte da mesma e ao município de Alenquer; (iv) e no lado Oeste da bacia, desde o setor central do município de Arruda dos Vinhos até ao município de Sobral de Monte Agraço (Figuras 4.3.8. a 4.3.11.).

Sobre a exposição da rede viária a DRP (Tabela 4.7.), estes troços situam-se na sua maioria ao longo de estradas primárias (16,4 km), autoestrada (8,2 km) e estradas terciárias (8,1 km), e incluem o único troço que liga toda a rede viária da bacia à autoestrada.

Tabela 4.7. – Extensão da rede viária nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais profundos (S1-DRP).

| Hierarquia | DRP | | | | | | | | | | Total |
|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|-------|
| | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | | Elevada | | Muito Elevada | | |
| | Extensão (km) | Extensão (%) | |
| Autoestrada | 3,98 | 18,5 | 2,22 | 10,3 | 7,09 | 33 | 4,49 | 20,9 | 3,68 | 17,2 | 21,47 |
| Via Primária | 20,54 | 39,9 | 5,43 | 10,6 | 9,05 | 17,6 | 8,35 | 16,2 | 8,08 | 15,7 | 51,44 |
| Via Secundária | 4,25 | 49,3 | 1,52 | 17,6 | 1,15 | 13,4 | 0,53 | 6,2 | 1,16 | 13,5 | 8,61 |
| Via Terciária | 14,40 | 40,2 | 6,33 | 17,7 | 7 | 19,6 | 3,82 | 10,7 | 4,23 | 11,8 | 35,79 |

Os troços expostos a DRS (Tabela 4.8.) localizam-se sobretudo ao longo de estradas primárias (13,6 km) e estradas terciárias (10,8 km).

Tabela 4.8. – Extensão da rede viária nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais superficiais (S1-DRS).

| Hierarquia | DRS | | | | | | | | | | Total |
|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|-------|
| | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | | Elevada | | Muito Elevada | | |
| | Extensão (km) | Extensão (%) | |
| Autoestrada | 1,67 | 9,1 | 9,95 | 54,1 | 2,98 | 16,2 | 2,60 | 14,1 | 1,19 | 6,5 | 18,39 |
| Via Primária | 9,46 | 18,4 | 22,77 | 44,3 | 5,65 | 11 | 5,29 | 10,3 | 8,28 | 16,1 | 51,44 |
| Via Secundária | 1,10 | 12,7 | 4,17 | 48,4 | 1,05 | 12,2 | 0,81 | 9,4 | 1,49 | 17,3 | 8,61 |
| Via Terciária | 5,30 | 14,8 | 14,90 | 41,6 | 4,76 | 13,3 | 4,73 | 13,2 | 6,10 | 17 | 35,79 |

Relativamente a DTS (Tabela 4.9.), a rede viária está menos exposta que a DRP ou a DRS, mas há troços que também devem receber atenção, principalmente ao longo de estradas primárias (8,5 km) e estradas terciárias (5,6 km).

Tabela 4.9. – Extensão da rede viária nas diferentes classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais superficiais (S1-DTS).

| Hierarquia | DTS | | | | | | | | | | Total |
|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|-------|
| | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | | Elevada | | Muito Elevada | | |
| | Extensão (km) | Extensão (%) | |
| Autoestrada | 14,68 | 74,2 | 1,91 | 9,6 | 1,55 | 7,8 | 0,81 | 4,1 | 0,85 | 4,3 | 19,80 |
| Via Primária | 33,89 | 65,9 | 4,93 | 9,6 | 4,14 | 8 | 3,45 | 6,7 | 5,04 | 9,8 | 51,44 |
| Via Secundária | 4,27 | 49,5 | 1,46 | 16,9 | 0,97 | 11,3 | 0,77 | 8,9 | 1,15 | 13,4 | 8,61 |
| Via Terciária | 21,24 | 59,4 | 5,18 | 14,5 | 3,79 | 10,6 | 2,37 | 6,6 | 3,21 | 9,0 | 35,79 |

Os troços críticos (Figura 4.3.12.), resultantes da exposição conjunta aos três tipos de movimentos de vertente analisados neste trabalho, estão localizados (i) no setor Nordeste da bacia, (ii) no setor Sul da bacia e (iii) entre o setor Oeste e o setor central

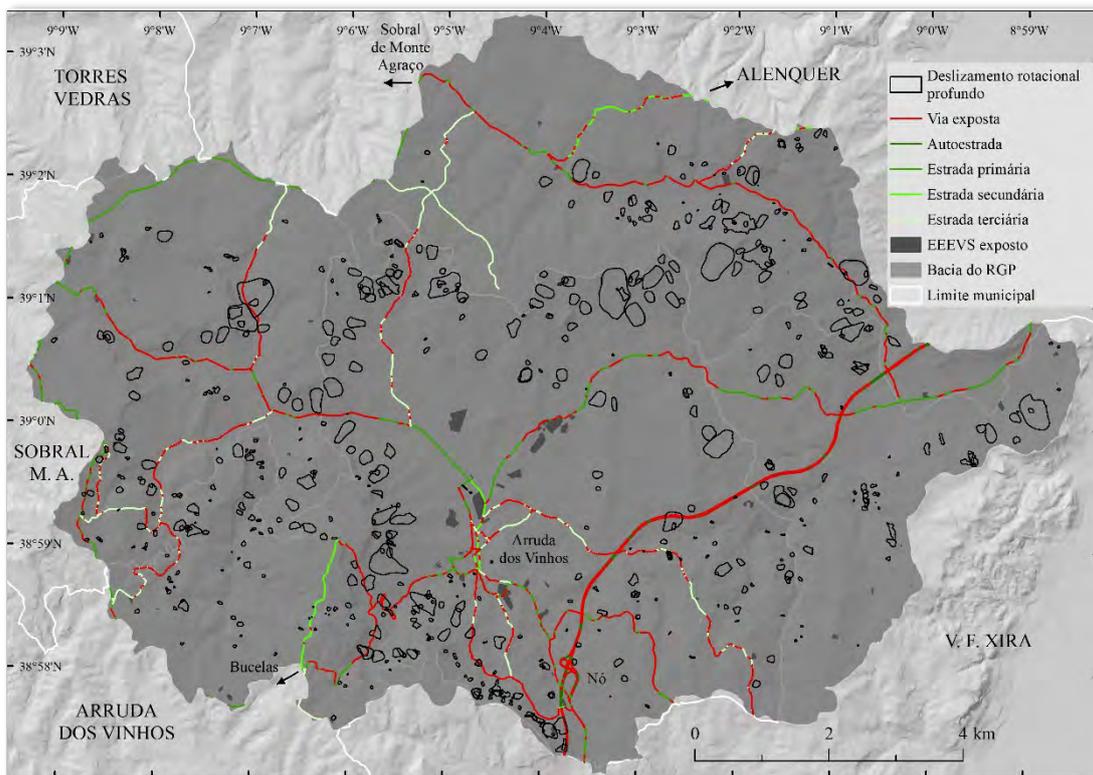


Figura 4.3.8. – Distribuição espacial dos EEEVs expostos e da rede viária exposta a DRP.

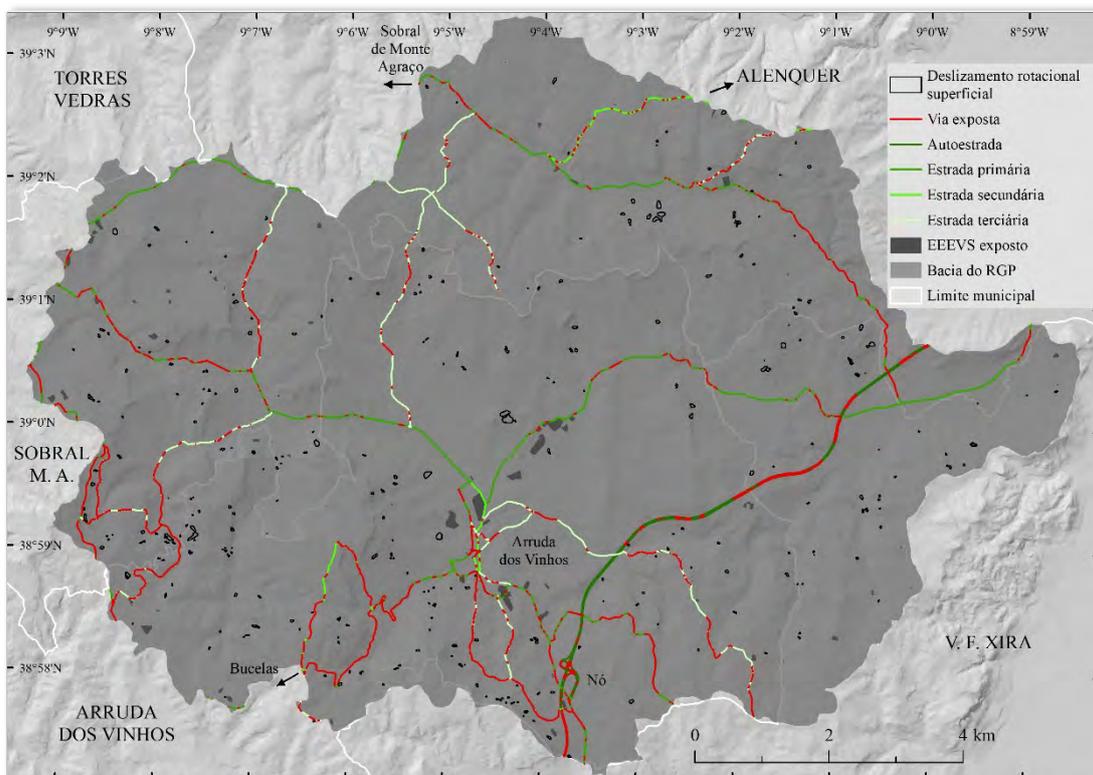


Figura 4.3.9. – Distribuição espacial dos EEEVs expostos e da rede viária exposta a DRS.

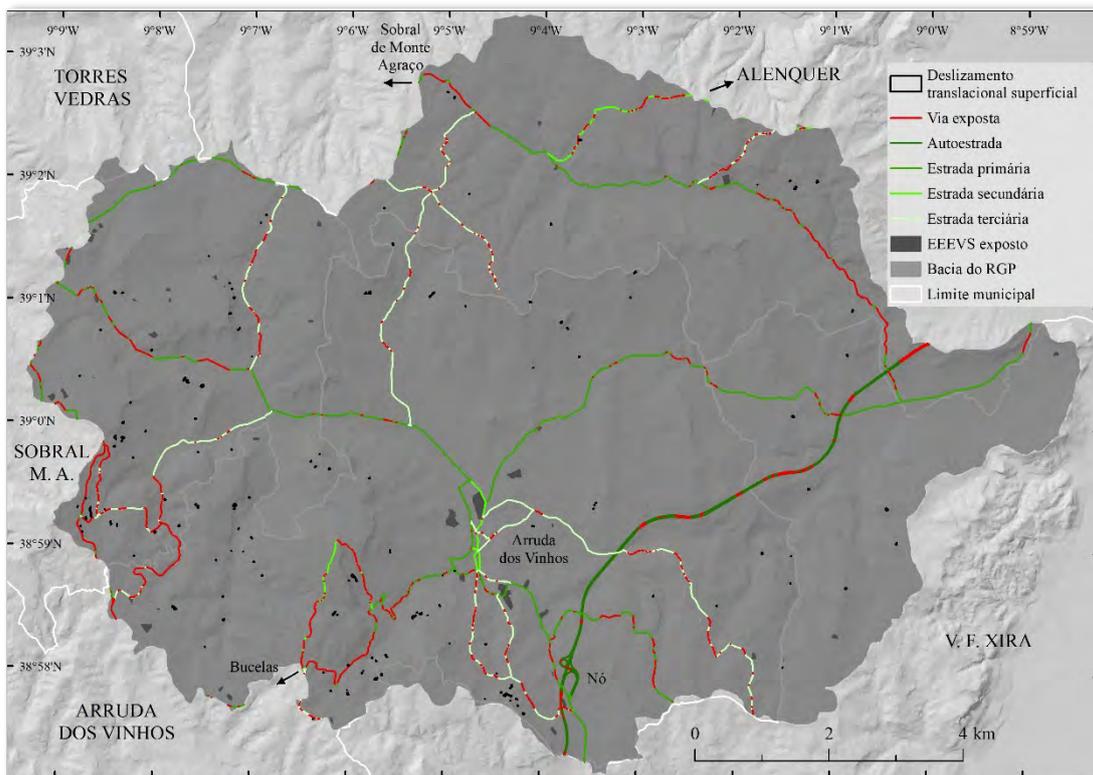


Figura 4.3.10. – Distribuição espacial dos EEEVS expostos e da rede viária exposta a DTS.

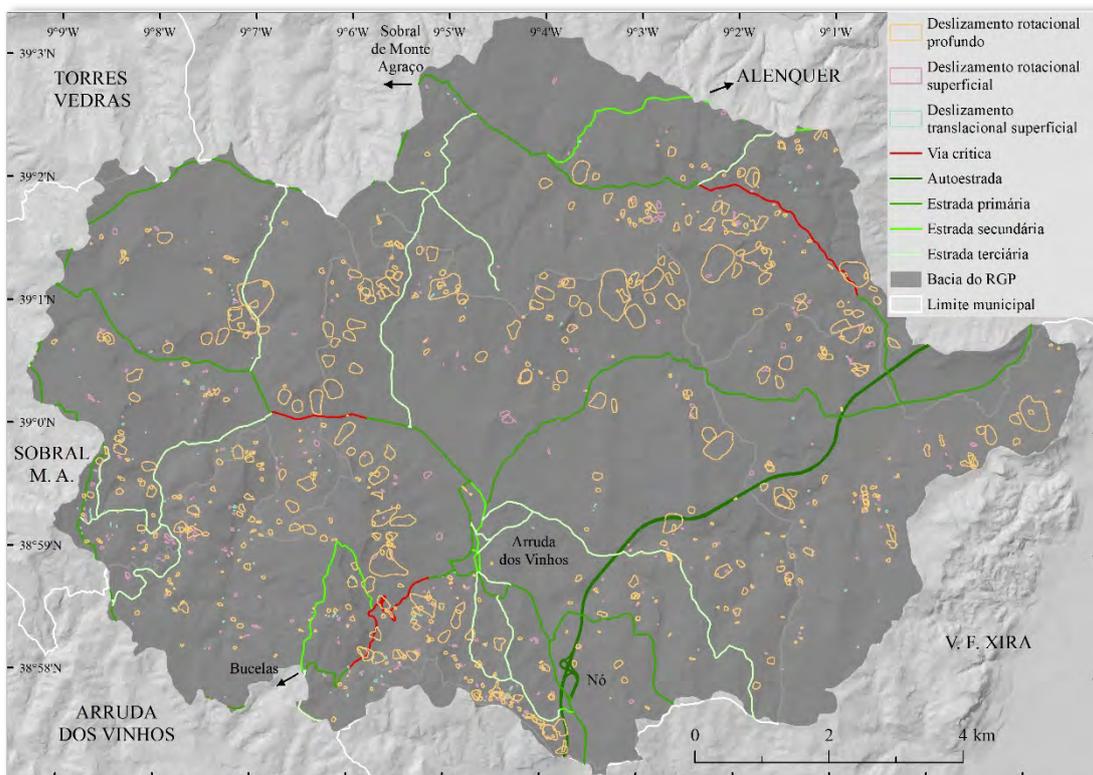


Figura 4.3.11. – Distribuição espacial dos troços críticos.

da bacia. Estes troços são importantes meios de comunicação, não só porque estabelecem a ligação das áreas mais marginais da bacia ao seu centro, bem como à sua vila mais importante (Arruda dos Vinhos), mas também porque estabelecem a ligação a outras vilas importantes localizadas fora ou maioritariamente fora da bacia do RGP (Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Bucelas).

4.4. Avaliação das áreas críticas de risco

As áreas críticas de risco a deslizamentos rotacionais profundos (cuja metodologia está descrita no subcapítulo 3.4.) delimitam áreas onde existe, simultaneamente, um maior número de edifícios residenciais expostos e um menor número de edifícios residenciais não-expostos. Estes edifícios, por sua vez, refletem a distribuição da população residente na bacia do Rio Grande da Pipa, de acordo com os grupos etários analisados. As áreas críticas de risco localizam-se, de forma geral, em dois setores da bacia do Rio Grande da Pipa (Figuras 4.4.1. a 4.4.4.).

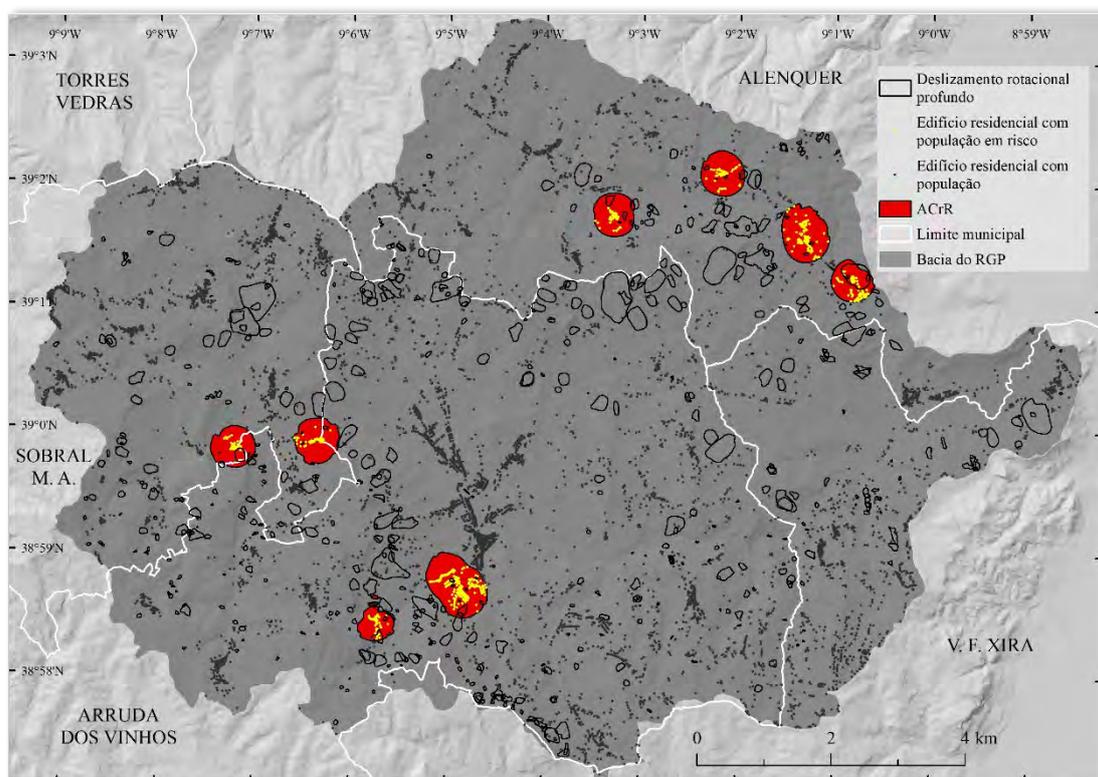


Figura 4.4.1. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente total.

O primeiro, situado no quadrante Sudoeste da bacia (O-SO-S), abrange as áreas críticas de risco que ocupam a parte central do município de Arruda dos Vinhos, já próximo do município de Sobral de Monte Agraço. O segundo, localizado no setor Nordeste da bacia, abrange as restantes áreas críticas de risco, numa área que é administrada pelo município de Alenquer, situada próximo da ribeira de Santana da Carnota, afluente da margem esquerda do Rio Grande da Pipa.

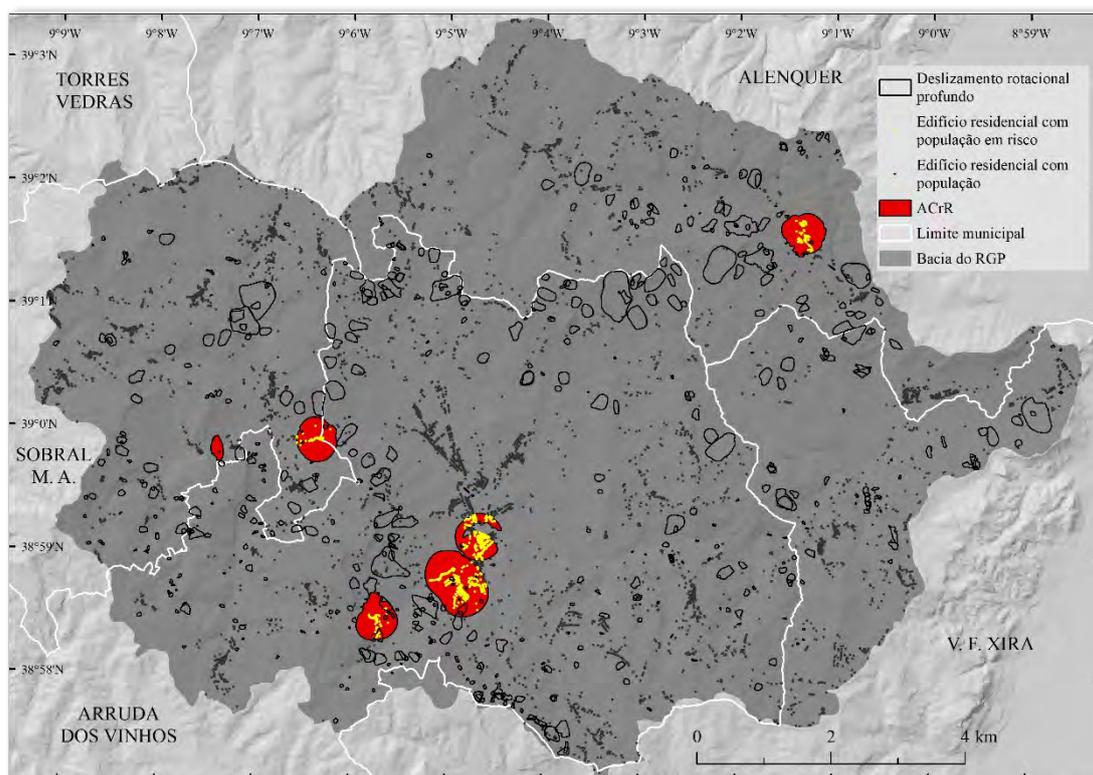


Figura 4.4.2. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente com idade igual ou inferior a 9 anos.

As áreas críticas de risco respeitantes à população com idade igual ou inferior a 9 anos, bem como à população com idade igual ou superior a 65 anos, ocupam, de forma geral, as mesmas áreas que as da população total, embora com ligeiras diferenças (Figuras 4.4.2. a 4.4.4.). Pode-se afirmar que as áreas críticas de risco que integram a população total apresentam a distribuição geral da população residente exposta, enquanto as áreas críticas de risco para os dois grupos etários analisados expressam as diferenças na distribuição espacial da população com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos. Por exemplo, as áreas críticas de risco situadas nos lugares de Giesteira, Quinta da Carnota e Souto (ver Figura 2.4.) não foram detetadas

na modelação da população em risco com idade igual ou inferior a 9 anos, mas foram na modelação da população em risco com idade igual ou superior a 65 anos.

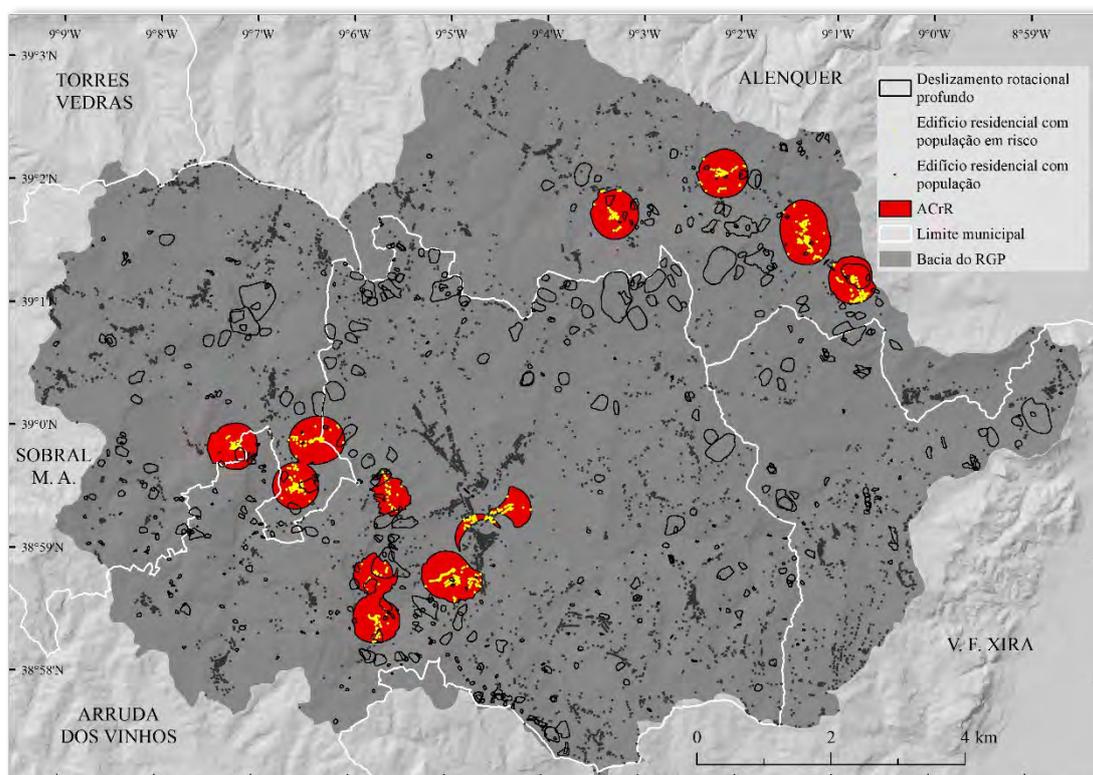


Figura 4.4.3. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente com idade igual ou superior a 65 anos.

Destaca-se, também, o facto de algumas áreas críticas de risco localizarem-se exatamente na raia dos municípios de Arruda dos Vinhos e Sobral de Monte Agraço: a primeira, observando de Este para Oeste, situada nas localidades de Pé do Monte e de Sabugos, e a segunda na localidade de Paço (toponímia representada na Figura 2.4.), podem requerer uma gestão intermunicipal do risco, o que exige uma cooperação flexível e coordenada entre os dois municípios.

Em termos quantitativos, as áreas críticas de risco que consideram a população total ocupam uma área total de cerca de 3 km², abrangendo 616 edifícios residenciais (8 % do número total de edifícios habitados), onde residem 2126 pessoas (17 % da população total). As áreas críticas de risco relativas à população com idade igual ou inferior a 9 anos são as que ocupam menos área (cerca de 2 km²), mas são as que detêm uma maior densidade de população em risco, com 1441 habitantes por km², e uma maior

densidade de população mais vulnerável em risco, com 405 habitantes desse grupo etário por km², ambos distribuídos por 605 edifícios residenciais.

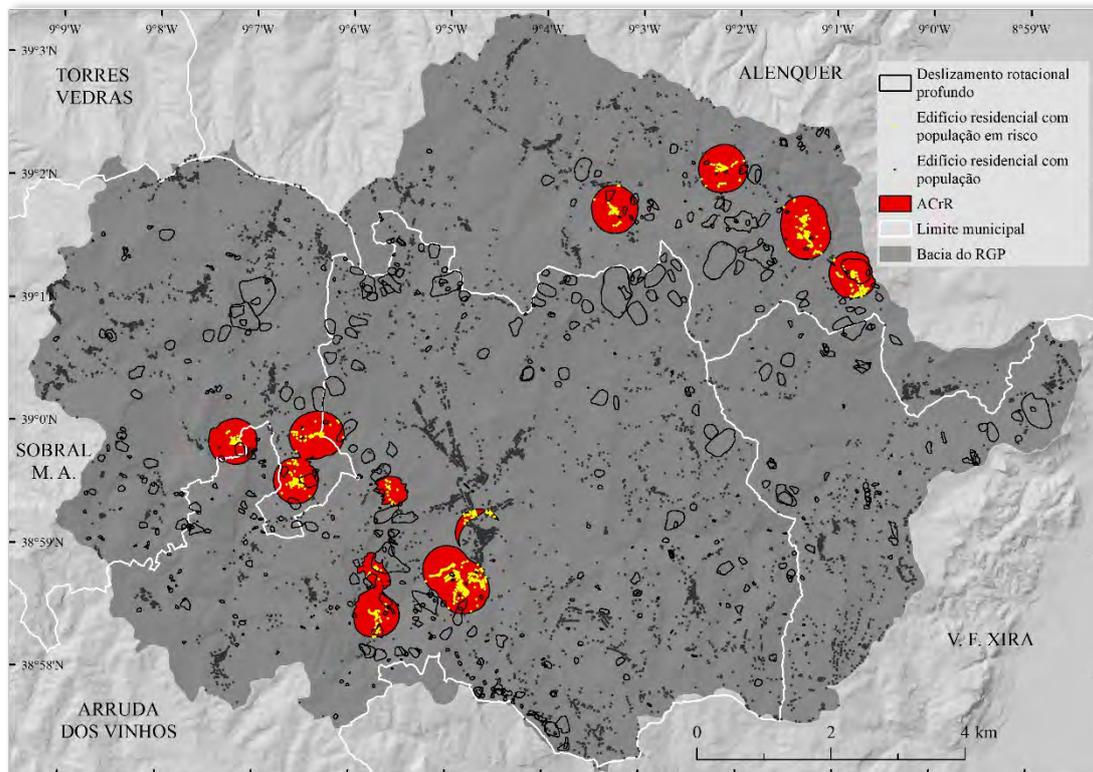


Figura 4.4.4. – Identificação das áreas críticas de risco (ACrR) a deslizamentos rotacionais profundos, considerando a população residente com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos.

Este dado merece atenção, visto que conjuga dois fatores que agravam a situação de risco: primeiro, o facto de se tratar de um grupo etário mais vulnerável e, em segundo, concentrado em áreas com suscetibilidade Elevada e Muito Elevada a deslizamentos rotacionais profundos. As áreas críticas de risco afetas à população com idade igual ou superior a 65 anos são as que ocupam uma maior área (cerca de 5 km²) e são as que detêm uma menor densidade de população em risco em qualquer um dos grupos etários. Por fim, as áreas críticas de risco que consideram a população com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos são igualmente extensas (cerca de 4 km²) e abrangem um maior número de edifícios residenciais habitados (755 edifícios) e são, também, as que detêm um maior número de população residente em risco (2830 habitantes).

Neste trabalho, o conceito de *Worst Case Scenario* aplica-se às áreas prévia e simultaneamente definidas como áreas críticas de suscetibilidade e áreas críticas de risco relativas à população total, o que se traduz na identificação de uma área (Figura 4.4.5).

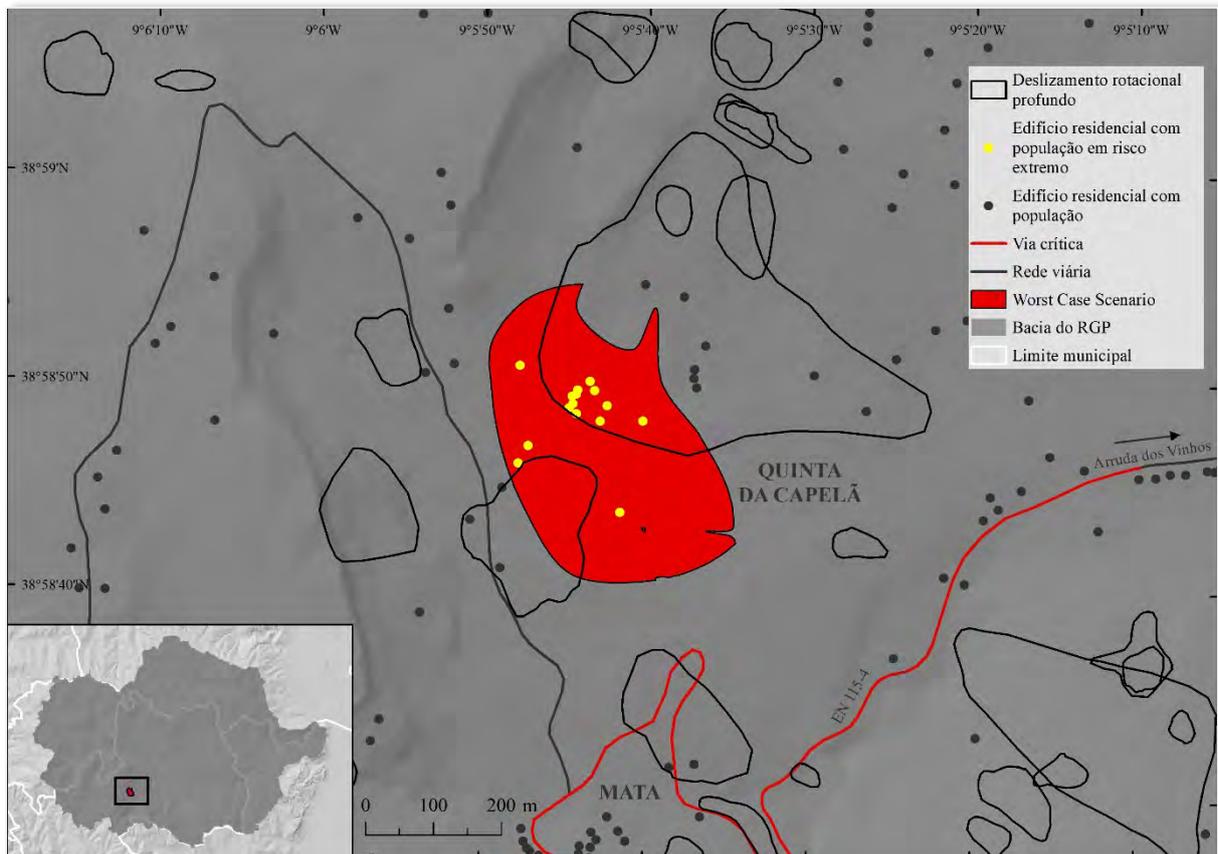


Figura 4.4.5. – Identificação da área definida como *Worst Case Scenario*.

A área identificada como *Worst Case Scenario*, localizada em Quinta da Capelã, enquadrada na sub-bacia de Salema, engloba 15 edifícios residenciais, todos habitados por população dos grupos etários mais vulneráveis, onde residem 18 pessoas. Quanto à instabilidade, esta área está situada sobre dois deslizamentos rotacionais profundos: o de menor dimensão, com uma área de 763 m² e anterior a 2010, e o de maior dimensão, com uma área próxima dos 150 000 m² e desencadeado em dezembro de 1989 (Oliveira, 2012). Este último, tratando-se do quarto maior deslizamento do inventário de movimentos de vertente da área em estudo, merece especial atenção. Trata-se de um deslizamento cujo estado de atividade, à data do levantamento de campo (março de 2006 e dezembro de 2009), foi considerado dormente (Oliveira,

2012); no entanto, Oliveira *et al.* (2015), recorrendo a técnicas de interferometria de radar, reconsideraram a área reativada. A deformação observada entre abril de 2010 e março de 2011 no flanco direito do deslizamento variou, de forma geral, entre 3 e 10 mm/ano, tendo atingido um máximo de deformação de 10 a 15 mm/ano (Oliveira *et al.*, 2015). Além disso, a concentração de vários pontos PS ainda permitiu a Oliveira *et al.* (2015) delimitar uma outra área instável de menor dimensão no centro do deslizamento da Capelã, reforçando ainda mais o que já foi referido sobre a suscetibilidade e o risco desta área.

Outro pormenor a ter em consideração é que, segundo a base de dados da rede viária, a Quinta da Capelã faz ligação a Arruda dos Vinhos por uma via crítica. Dado que a base de dados relativa à distribuição da rede viária não está completa, isto é, não inclui informação sobre todas as vias transitáveis da área de estudo, não é possível aferir se este facto compromete o acesso à Quinta da Capelã, a partir de Arruda dos Vinhos, em caso de disrupção total da via crítica. Contudo, se for o único acesso, isto pode dificultar, ou mesmo impedir, a chegada de veículos de emergência provenientes de Arruda dos Vinhos à localidade, comprometendo a segurança da população local.

Por fim, é importante ter em consideração que, dado que esta é a única área resultante da interseção entre áreas críticas de suscetibilidade e áreas críticas de risco, conclui-se que as áreas críticas de risco não se sobrepõem necessariamente às áreas críticas de suscetibilidade. Assim, por serem áreas diferentes, as medidas aplicadas às áreas críticas de suscetibilidade devem também ser diferentes daquelas aplicadas às áreas críticas de risco. As áreas críticas de suscetibilidade devem ser alvo de medidas de prevenção, nomeadamente, para evitar a expansão urbana nestas áreas. No caso das áreas críticas de risco, devem-se aplicar medidas de mitigação, pelo que a implementação de um sistema de alerta pode ser crucial para salvaguardar pessoas e bens.

V

Conclusão

Neste trabalho pretendeu-se criar uma metodologia que permitisse a definição de áreas críticas de suscetibilidade a movimentos de vertente e áreas críticas de risco. A bacia do Rio Grande da Pipa foi escolhida como área de estudo e de teste, por se enquadrar num contexto geomorfológico particularmente propenso à ocorrência de movimentos de vertente, como é o caso da região a Norte de Lisboa. O trabalho realizado ao longo desta dissertação permitiu concluir os objetivos específicos delineados inicialmente.

Os mapas de suscetibilidade classificados dos modelos S₁-DRP e S₂-DRP assinalam como áreas mais suscetíveis as vertentes dominadas por depósitos de vertente, margas e argilitos, e margas. As semelhanças entre ambos confirmam o peso que os deslizamentos rotacionais profundos de maior magnitude têm nos dois inventários. O mapa de suscetibilidade classificado que derivou do modelo S₃-DRP apresenta uma distribuição da suscetibilidade parcialmente diferente, ganhando relevância como áreas mais suscetíveis as vertentes situadas na margem direita do Rio Grande da Pipa, com exposição a Nordeste e Este, localizadas ao longo dos vales de orientação geral S-N, que predominam no setor Sul da bacia do RGP. A concordância entre as áreas mais suscetíveis de S₃-DRP e as de S₁-DRS demonstram que os deslizamentos rotacionais profundos de menor magnitude são condicionados pelos mesmos fatores que condicionam a ocorrência de deslizamentos rotacionais superficiais. Este facto parece resultar também de uma maior aproximação entre ambos os tipos de movimentos de vertente em termos de profundidade de superfície de rotura e magnitude. Os deslizamentos translacionais superficiais tendem a ocorrer nas áreas mais declivosas da bacia e nos vales mais encaixados. A análise da concordância espacial permitiu aferir que a utilização de inventários de movimentos de vertente com magnitude distinta para o treino e para a validação dos modelos pode produzir diferenças significativas no zonamento da suscetibilidade a movimentos de vertente. Quanto à hierarquização das sub-bacias, a de Salema é a mais importante do ponto de vista da

suscetibilidade a deslizamentos, sendo a única a cumprir ambos os critérios nas três tipologias de instabilidade.

As áreas críticas de suscetibilidade delimitam áreas onde se observa, simultaneamente, suscetibilidade Elevada ou Muito Elevada a deslizamentos rotacionais profundos e uma elevada concentração de área deslizada, que se pode traduzir na presença de uma ocorrência de grande magnitude ou na presença de várias ocorrências de menor magnitude. Estas áreas tendem a localizar-se sobre alguns dos maiores deslizamentos inventariados e ocupam, principalmente, vertentes talhadas em sequências litoestratigráficas de margas e argilitos e caracterizadas por declives moderados (5° a 15°) e vertentes orientadas a Sudeste.

Quanto à exposição dos edifícios residenciais a deslizamentos rotacionais profundos, podemos retirar dois factos de maior importância: (i) em 2018, 20 % (1555) dos edifícios residenciais localizavam-se em áreas suscetíveis; e (ii) entre 1995 e 2018, 381 edifícios residenciais foram construídos em áreas suscetíveis, o que representa 25 % de todos os edifícios residenciais contruídos nesse período. Isto significa que a expansão urbana foi feita de forma significativa para áreas potencialmente instáveis, resultando numa elevada exposição atual do edificado residencial a deslizamentos rotacionais profundos. Relativamente à população residente, 20 % dos habitantes (3033) residem em áreas suscetíveis. Desses 3033, 498 são crianças ou idosos. Os grandes focos de população residente exposta encontram-se ao longo das margens da Ribeira de Santana da Carnota, mais concretamente nos arredores da aldeia de Refugidos, e no conjunto de aglomerados estabelecidos no sopé das vertentes a Oeste de Arruda dos Vinhos: Paço, Pé do Monte, Giesteira, Quinta da Capelã e Mata. Os Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis (EEEVS) estão expostos principalmente a deslizamentos rotacionais profundos (12 %) e rotacionais superficiais (10 %). Em suma, quase todos os tipos de EEEVS encontram-se expostos. Excetuam-se o Hospital/Centro de Saúde e o Quartel. Sobre a rede viária, 29 % (34,6 km) da sua extensão está exposta a deslizamentos rotacionais profundos, 27 % (30,5 km) a deslizamentos rotacionais superficiais e 25 % (17,6 km) a deslizamentos translacionais superficiais. A exposição incide principalmente sobre estradas primárias, estradas terciárias e a autoestrada. Além de mais, o único nó que permite a ligação da bacia do Rio Grande da Pipa à

autoestrada está exposto a deslizamentos rotacionais profundos. Os troços críticos, que resultam da exposição conjunta aos três tipos de movimentos de vertente analisados, estão localizados nos setores Nordeste, Sul e Oeste da bacia, considerados importantes meios de comunicação e ligação entre o centro e as áreas mais marginais da bacia, que estabelecem conexão com outras localidades significantes fora da área de estudo.

As áreas críticas de risco delimitam áreas onde existe, simultaneamente, um maior número de edifícios residenciais expostos e um menor número de edifícios residenciais não-expostos. Estas situam-se essencialmente em dois setores da bacia. O primeiro, situado no quadrante Sudoeste da bacia (O-SO-S), abrange as áreas críticas de risco que ocupam a parte central do município de Arruda dos Vinhos, próximo do município de Sobral de Monte Agraço. O segundo, localizado no setor Nordeste da bacia, abrange as restantes áreas críticas de risco, numa área que é administrada pelo município de Alenquer, situada próximo da Ribeira de Santana da Carnota, afluente da margem esquerda do Rio Grande da Pipa. As áreas críticas de risco que consideram a população com idade igual ou inferior a 9 anos ou igual ou superior a 65 anos ocupam cerca de 4 km² e são as que abrangem um maior número de edifícios residenciais habitados (755 edifícios) e, também, as que detêm um maior número de população residente em risco (2830 habitantes). Comprovou-se que a metodologia aplicada consegue delimitar áreas críticas de risco, mas certamente que muitos aspetos poderiam ser melhorados. Os dados de entrada, principalmente os que dizem respeito à distribuição e caracterização da população residente, foram adaptados o melhor possível ao contexto deste trabalho, considerando as suas limitações, e o método estatístico Getis-Ord G_i^* , apesar de ser adequado, tem uma tendência para centralizar os limites das áreas críticas de risco, ignorando, por vezes, a população exposta das áreas limítrofes, provavelmente devido às restrições impostas pelo raio de vizinhança ou mesmo devido ao método de classificação aplicado. O único *Worst Case Scenario*, resultante da interseção entre áreas críticas de suscetibilidade e áreas críticas de risco relativas ao grupo etário mais vulnerável, está localizado em Quinta da Capelã, sub-bacia da Salema (a única classificada em primeiro lugar na hierarquia de suscetibilidade), e engloba 15 edifícios residenciais, onde residem 18 pessoas. Esta área

está situada sobre dois deslizamentos rotacionais profundos, um deles em estado de reativação. Além disso, a estrada principal (primária) que liga a Quinta da Capelã a Arruda dos Vinhos está classificada como via crítica e, dependendo dos acessos disponíveis, em caso de evento desencadeante de instabilidade, pode condicionar o acesso e trânsito de veículos de emergência provenientes de Arruda dos Vinhos.

Por fim, respondendo às hipóteses lançadas no início desta dissertação, a distribuição espacial dos elementos expostos viabiliza a definição de áreas críticas de risco (hipótese 1) e, portanto, esta informação pode ser utilizada para replicação da metodologia em outras áreas de estudo; as áreas mais suscetíveis não são necessariamente as mesmas onde se verifica um maior risco (hipótese 2), visto que, como se observou, a interseção entre ambas permitiu a criação de apenas uma única superfície. Este facto realça a necessidade de avaliação de ambas, de forma independente, e a aplicação de diferentes estratégias em cada uma.

Importa, ainda, salientar que este trabalho apresenta fragilidades evidentes. O método de partição dos inventários utilizados para os modelos S₂-DRP e S₃-DRP baseia-se em diferenças de magnitude. Assim, porque os deslizamentos que compõem os inventários de validação não são governados pelas mesmas condições que condicionam os deslizamentos que compõem os inventários de treino, não são adequados para essa finalidade. Neste caso, a solução seria utilizar outro método de partição, como por exemplo, dos deslizamentos de maior magnitude, selecionar 70% para treino e 30% para validação. O mesmo princípio aplicar-se-ia à partição dos inventários para treinar e validar o modelo S₃-DRP, embora aos deslizamentos de menor magnitude. Outra fragilidade está afeta à distribuição da população. Os censos não consideram habitações não recenseadas, pelo que uma parte da população não se encontra georreferenciada. Além disso, a utilização do edificado como elemento de distribuição da população acrescenta incerteza ao modelo, visto que as pessoas movem-se ao longo do dia. O Getis-Ord Gi* é um excelente método para detetar focos de interesse, mas peca na definição de limites, sendo estes difusos, obrigando o investigador a defini-los de outra forma. Neste caso, sugiro que agregando os resultados a uma matriz hexagonal, os limites podem ser definidos mais facilmente. Por fim, talvez a maior fragilidade deste trabalho seja a não validação desta

metodologia “universal”. Não se conclui se esta é replicável ou não a outras áreas de estudo, pelo que esta questão, a juntar-se às anteriores, pode muito bem integrar o plano de trabalhos de uma investigação futura, dando continuidade a este projeto.

R

Referências bibliográficas

Abante, A. M. R. (2021). Risk hotspot conceptual space characterized by hexagonal data binning technique: An application in Albay, Philippines. *International Journal of Computing Sciences Research*, V(1), 550-567. <https://doi.org/10.25147/ijcsr.2017.001.1.58>

Alves, C. J. S. (2018). *Padrões de vulnerabilidade estrutural em estradas e edifícios associados à ocorrência de movimentos de vertente*. [Road network and buildings vulnerability patterns related to landslides]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/36233>

Asare-Kyei, D., Renauld, F. G., Kloos, J., Walz, Y., & Rhyner, J. (2017). Development and validation of risk profiles of West African rural communities facing multiple natural hazards. *PLoS ONE*, XII(3), e0171921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171921>

Ayalew, L., Yamagishi, H., & Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1, 73-81. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0006-9>

Barella, C. F., Sobreira, F. G., & Zêzere, J. L. (2018). A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3205-3221. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1341-3>

Benevides, P. (2009). *Aplicação da interferometria radar no estudo de deslizamentos de terra na região de Lisboa* [Radar interferometry application to the study of landslides in the region of Lisbon]. (Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa). Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/3599>

Bi, J., & Bennett, K. P. (2003). Regression Error Characteristic Curves. In T. Fawcett & N. Mishra (Eds.), *Proceeding of the Twentieth International Conference on Machine Learning (ICML-2003)* (pp. 43-50). AAAI Press.

Biçer, Ç. T., & Ercanoglu, M. (2020). A semi-quantitative landslide risk assessment of central Kahramanmaraş City in the Eastern Mediterranean region of Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 732. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05697-w>

Bromhead, E. N. (1999). *The Stability of Slopes* (4th edition). Spon Press.

Bui, D. T., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59, 1413-1444. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9844-2>

Capitani, M., Ribolini, A., & Bini, M. (2013). The slope aspect: A predisposing factor for landsliding?. *Comptes Rendus Geoscience*, 345, 427-438. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.11.002>

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>

Catani, F., Segoni, S., & Falorni, G. (2010). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, XLVI(W05508). <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>

Chauhan, S., Sharma, M., & Arora, M. K. (2010). Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides*, 7, 411-423. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0202-3>

Chen, Q., Ding, M., Yang, X., Hu, K., & Qi, J. (2018). Spatially explicit assessment of heat health risk by using multi-sensor remote sensing images and socioeconomic data in Yangtze River Delta, China. *International Journal of Health Geographics*, 17, 15. <https://doi.org/10.1186/s12942-018-0135-y>

Christie, E. K., Spencer, T., Owen, D., McIvor, A. L., Möller, I., & Viavattene, C. (2018). Regional coastal flood risk assessment for a tidally dominant, natural coastal setting: North Norfolk, southern North Sea. *Coastal Engineering*, 134, 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.05.003>

Chung, C.-J. F., & Fabbri, A. G. (2005). Systematic Procedures of Landslide Hazard Mapping for Risk Assessment Using Spatial Prediction Models. In T. Glade, M. Anderson & M. J. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (pp. 139-174). John Wiley & Sons, Ltd.

Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, XX(1), 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F., & Critelli, S. (2012). Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vitravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards*, 61, 127-141. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0781-0>

Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M. C., & Vlaicu, M. (2011). Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 63, 397-406. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0724-y>

Corominas, J., Van Westen, C. J., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>

Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (7th edition). Spon Press.

Crozier, M. J. (2005). Management Frameworks for Landslide Hazard and Risk: Issues and Options. In T. Glade, M. Anderson & M. J. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (pp. 331-350). John Wiley & Sons, Ltd.

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>

Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)

De Risi, R., Jalayer, F., De Paola, F., & Lindely, S. (2018). Delineation of flooding risk hotspots based on digital elevation model, calculated and historical flooding extents: the case of Ouagadougou. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 1545-1559. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1450-8>

De Risi, R., Jalayer, F., De Paola, F., Carozza, S., Yonas, N., Giugni, M., & Gasparini, P. (2020). From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa. *Natural Hazards*, 100, 387-415. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03817-8>

Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M.-L., & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*, IX(3-4), 383-400. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090311>

Dilley, M. (2013). Disaster risk hotspots: A project summary. In J. Birkmann (Ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards* (pp. 211-218). United Nations University Press.

Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B., & Yetman, G. (2005). *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. The World Bank.

Francis, P. & Oppenheimer, C. (2004). *Volcanoes* (2nd edition). Oxford University Press.

Froude, M. J., & Petley, D. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, *CII*(3-4), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>

Ferreira, A. B. (1984). Mouvements de terrain dans la Région au Nord de Lisbonne. Conditions morphostructurales et climatiques. In J.-C. Flageollet (Ed.), *Mouvements de Terrain. Colloque de Caen, Documents du B. R. G. M.*, 83 (pp. 4485-494). B. R. G. M.

Ferreira, A. B., Zêzere, J. L., & Rodrigues, M. L. (1987). Instabilidade dos versantes dans la région au Nord de Lisbonne. Essai de cartographie géomorphologique. *Finisterra*, *XXII*(43), 227-246. <https://doi.org/10.18055/Finis1999>

Fonseca, R. (2020). *Determinação da suscetibilidade à ocorrência de instabilidade em vertente à escala regional com métodos de base física* [Susceptibility assessment to the occurrence of slope instability at the regional scale with physical-based methods]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/45456>

Garcia, R. A. C., Zêzere, J. L., & Oliveira, S. C. (2007). A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertentes [The data classification process importance in cartography: an example on landslide susceptibility mapping]. In Associação Portuguesa de Geomorfólogos (Eds.), *Dinâmicas geomorfológicas. Metodologias. Aplicação.* (pp. 265-280). Associação Portuguesa de Geomorfólogos.

Garcia, R. A. C. (2012). *Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a Movimentos de Vertente: Aplicação na bacia do rio Alenquer* [Landslide Hazard and Risk Assessment Methodologies: Application to the Alenquer river basin]. [Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/7377>

Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Zêzere, J. L. (2016). Assessing population exposure for landslide risk analysis using dasymetric cartography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *16*, 2769-2782. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2769-2016>

Garcia, R. A. C., & Oliveira, S. C. (2020). Portugal Landslide Hazardscapes. In G. Vieira, J. L. Zêzere, & C. Mora (Eds.), *Landscapes and Landforms of Portugal* (pp. 63-72). Springer Nature Switzerland AG.

Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, *162*, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>

Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, *XXIV*(3), 189-206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>

Guillard, C., & Zêzere, J. L. (2012). Landslide Susceptibility Assessment and Validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental Management*, *50*, 721-735. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9921-7>

Guisan, A., Weiss, S. B., & Weiss, A. D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, *CXLIII*(1), 107-122. <https://doi.org/10.1023/A:1009841519580>

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, *81*, 166-184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>

Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M., & Melillo, M. (2020). Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews*, *200*, 102973. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102973>

Hagen, A. (2002, April). *Multi-method assessment of map similarity*. 5th AGILE Conference on Geographic Information Science, Palma de Mallorca, Spain.

Hazarika, N., Barman, D., Das, A. K., Sarma, A. K., & Borah, S. B. (2018). Assessing and mapping flood hazard, vulnerability and risk in the Upper Brahmaputra River valley using stakeholders knowledge and multicriteria evaluation (MCE). *Journal of Flood Risk Management*, *11*, 700-716. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12237>

Henriques, C., Zêzere, J. L., & Marques, F. (2015). The role of the lithological setting on the landslide pattern and distribution. *Engineering Geology*, *189*, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.025>

Hu, K., Yang, X., Zhong, J., Fei, F., & Qi, J. (2017). Spatially explicit mapping of heat health risk utilizing environmental and socioeconomic data. *Environmental Science & Technology*, *51*, 1498-1507. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04355>

Huang, H., Chen, X., Zhu, Z., Xie, Y., Liu, L., Wang, X., Wang, X., & Liu, K. (2018). The changing pattern of urban flooding in Guangzhou, China. *Science of the Total Environment*, *622-623*, 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.358>

Jacobs, L., Dewitte, O., Poesen, J., Sekajugo, J., Nobile, A., Rossi, M., Thiery, W., & Kervyn, M. (2018). Field-based landslide susceptibility assessment in a data-scarce environment: the populated areas of the Rwenzori Mountains. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *18*, 105-124. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-105-2018>

Jaedicke, C., Van Den Eeckhaut, M., Nadim, F., Hervás, J., Kalsnes, B., Vangelsten, B. V., Smith, J. T., Tofani, V., Ciurean, R., Winter, M. G., Sverdrup-Thygeson, K., Syre, E., & Smebye, H. (2014). Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *73*, 325-339. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0541-0>

Jalayer, F., De Risi, R., De Paola, F., Giugni, M., Manfredi, G., Gasparini, P., Topa, M. E., Yonas, N., Yeshitela, K., Nebebe, A., Cavan, G., Lindley, S., Printz, A., & Renner, F. (2014). Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. *Natural Hazards*, *73*, 975-1001.

<https://doi.org/10.1007/s11069-014-1119-2>

Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v.1.3a. Jenness Enterprises, Flagstaff, AZ, USA. Retirado de: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>

Jesus, C. C., Oliveira, S. C., Sena, C., & Marques, F. (2014). Deslizamentos na região de Arruda dos Vinhos numa perspetiva regional e local: resultados preliminares [Landslides from the Arruda dos Vinhos in a regional and a local perspective: preliminary results]. *Comunicações Geológicas, CI(2)*, 903-906.

Jesus, C. C. (2015). *Deslizamentos na bacia hidrográfica do Rio Grande da Pipa (Portugal): perspetivas regional e local* [Landslides at the Rio Grande da Pipa drainage basin (Portugal): regional and local perspectives]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa.

Jesus, C. C., Oliveira, S. C., Sena, C., & Marques, F. (2018). Understanding Constraints and Triggering Factors of Landslides: Regional and Local Perspectives on a Drainage Basin. *Geosciences, VIII(1)*, 2. <https://doi.org/10.3390/geosciences8010002>

Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Branco, M. C., & Zêzere, J. L. (2009). *Guião 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.

Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4-15. <https://doi.org/j.geomorph.2015.03.016>

Kjekstad, O., & Highland, L. (2009). Economic and Social Impacts of Landslides. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer.

Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Terrinha, P., Callapez, P., & Martins, L. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (pp. 317-368). Universidade de Évora.

Lajas, S. (2016). *Integração de métodos estatístico e determinístico para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos superficiais* [Integration of statistical and deterministic methods for susceptibility to shallow slides assessment]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/25695>

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, XXXIII(1)*, 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>

- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47, 982-990. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>
- Leis, J.-L., & Kienberger, S. (2020). Climate risk and vulnerability assessment of floods in Austria: Mapping homogenous regions, hotspots and typologies. *Sustainability*, 12, 6458. <https://doi.org/10.3390/su12166458>
- Li, H., Calder, C. A., & Cressie, N. (2007). Beyond Moran's *I*: Testing for Spatial Dependence Based on the Spatial Autoregressive Model. *Geographical Analysis*, XXXIX(4), 357-375. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2007.00708.x>
- Li, L., & Zha, Y. (2020). Population exposure to extreme heat in China: Frequency, intensity, duration and temporal trends. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102282. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102282>
- Machado, M. J. (1991). *Contribuição para o estudo da bacia-vertente do Rio Grande da Pipa* [Contribution for the study of the Grande da Pipa river basin]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa].
- Matos, L. (2008). *Estabilidade de taludes em rochas silto-argilosas – Técnicas de remediação para roturas superficiais* [Slope stability in silty-clay rocks – Remediation techniques for shallow ruptures]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa].
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica (Zagreb)*, XXII(3), 276-282.
- Meneses, B. M., Pereira, S., & Reis, E. (2019). Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, XIX(3), 471-487. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-471-2019>
- Mitchell, A. (2005). *The Esri Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. Esri Press.
- Moran, P. A. P. (1948). The Interpretation of Statistical Maps. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, X(2), 243-251. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1948.tb00012.x>
- Moran, P. A. P. (1950). A Test for the Serial Independence of Residuals. *Biometrika*, 37, 178-181. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.178>
- Nadim, F., Kjekstad, O., Domaas, U., Rafat, R., & Peduzzi, P. (2006a). Global Landslides Risk Case Study. In M. Arnold, R. S. Chen, U. Deichmann, M. Dille, A. L. Lerner-Lam, R. E. Pullen & Z. Trohanis (Eds.), *Natural Disaster Hotspots Case Studies* (pp. 21-78). The World Bank.

Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., & Jaedicke, C. (2006b). Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3, 159-173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>

Nadim, F. & Kjekstad, O. (2009). Assessment of Global High-Risk Landslide Disaster Hotspots. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides – Disaster Risk Reduction* (pp. 213-222). Springer-Verlag.

Nadim, F., Jaedicke, C., Smebye, H., & Kalsnes, B. (2013). Assessment of global landslide hazard hotspots. In K. Sassa, B. Rouhban, S. Briceno, M. McSaveney & B. He (Eds.), *Landslides: Global Preparedness* (pp. 59-71). Springer-Verlag.

Ohlmacher, G. C. (2007). Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology*, XCI(2-4), 117-134. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.005>

Oliveira, S. C. M. (2012). *Incidência espacial e temporal da instabilidade geomorfológica na bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos)* [Spatial and temporal incidence of geomorphological instability at the Grande da Pipa river basin (Arruda dos Vinhos)]. [Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/7383>

Oliveira, S. C., Zêzere, J. L., & Garcia, R. A. C. (2014). Determinação de limiares de precipitação para o desencadeamento de movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa, Arruda dos Vinhos [Assessment of rainfall thresholds for rainfall-triggering landslides at the Grande da Pipa river basin, Arruda dos Vinhos]. *Comunicações Geológicas*, CI(2), 919-922.

Oliveira, S. C., Zêzere, J. L., Catalão, J., & Nico, G. (2015a). The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, 12, 703-719. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0522-9>

Oliveira, S. C., Zêzere, J. L., & Garcia, R. A. C. (2015b). Structure and Characteristics of Landslide Input Data and Consequences on Landslide Susceptibility Assessment and Prediction Capability. In G. Lollino, D. Giordan, G. B. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski & N. Sciarra (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2* (pp. 189-192). Springer.

Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local Spatial Autocorrelation by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, XXVII(4), 286-306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>

Pereira, S., Zêzere, J. L., & Bateira, C. (2012). Technical Note: Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 979-988. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-979-2012>

Pereira, S., Zêzere, J. L., & Quaresma, I. (2017). Landslide Societal Risk in Portugal in the Period 1865-2015. In K. Sassa, M. Mikos & Y. Yin (Eds.), *Advancing Culture of Living with Landslides. Volume 1, ISDR-ICL Sendai Partnerships 2015-2025* (pp. 491-499). Springer.

Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, *XL*(10), 927-930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>

Piedade, A., Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., & Oliveira, S. C. (2011). Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na Região a Norte de Lisboa [Shallow-translational landslide susceptibility models in the Region North of Lisbon]. *Finisterra*, *XLVI*(91), 9-26. <https://doi.org/10.18055/Finis1322>

Pimenta, R. (2011). *Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente com métodos de base física* [Landslide susceptibility assessment with physically-based methods]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa]. Repositório da Universidade de Lisboa. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/8210>

Pollock, W., & Wartman, J. (2020). Human Vulnerability to Landslides. *GeoHealth*, *4*, e2020GH000287. <https://doi.org/10.1029/2020GH000287>

Pontius, R. G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *LXVI*(8), 1011-1016.

Promper, C., & Glade, T. (2016). Multilayer-exposure maps as a basis for a regional vulnerability assessment for landslides: applied in Waidhofen/Ybbs, Austria. *Natural Hazards*, *82*, 111-127. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2311-3>

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, *180*, 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>

Reis, E., Zêzere, J. L., Vieira, G. T., & Rodrigues, M. L. (2003). Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos [Spatial data integration in GIS for landslide susceptibility prediction]. *Finisterra*, *XXXVIII*(76), 3-34. <https://doi.org/10.18055/Finis1569>

Rogerson, P. (2001). *Statistical Methods for Geography* (1st edition). SAGE Publications Ltd.

Röthlisberger, V., Zischg, A. P., & Keiler, M. (2017). Identifying spatial clusters of flood exposure to support decision making in risk management. *Science of the Total Environment*, *598*, 593-603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.216>

Roxo, M. J. (1985). *Processos actuais de evolução de vertente (costeira de Lousa-Bucelas)* [Current slope evolution processes (Lousa-Bucelas hogback)]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa].

Sajjad, M., Chan, J. C. L., & Kanwal, S. (2020a). Integrating spatial statistics tools for coastal risk management: A case-study of typhoon risk in mainland China. *Ocean and Coastal Management*, *184*,

Sajjad, M., Chan, J. C. L., & Lin, N. (2020b). Incorporating natural habitats into coastal risk assessment frameworks. *Environmental Science and Policy*, 106, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.01.004>

Sajjad, M., Lin, N., & Chan, J. C. L. (2020c). Spatial heterogeneities of current and future hurricane flood risk along the U. S. Atlantic and Gulf coasts. *Science of the Total Environment*, 713, 136704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136704>

Shroder, J. F., & Davies, T. (2015). *Landslide Hazards, Risks, and Disaster*. Elsevier.

Singh, V. P. (1992). *Elementary Hydrology (1st edition)*. Prentice Hall, Inc.

Tobler, W. R. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, Supplement: Proceedings. International Geographical Union. Commission on Quantitative Methods, 234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>

Van Asch, T. W. J., Buma, J., & Van Beek, L. P. H. (1999). A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, XXX(1–2), 25–32. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00042-2)

Van Den Eeckhaut, M., Marre, A., & Poesen, J. (2010). Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne-Ardenne region (France). *Geomorphology*, 115, 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.042>

Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30, 399–419. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e>

Visser, H., & de Nijs, T. (2006). The Map Comparison Kit. *Environmental Modelling & Software*, 21, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.11.013>

Wang, Q., Guo, Y., Li, W., He, J., & Wu, Z. (2019). Predictive modeling of landslide hazards in Wen County, northwestern China based on information value, weights-of-evidence, and certainty factor. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, X(1), 820–835. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1549111>

Weiss, A. (2001, julho). Topographic position and landform analysis. In *21st Annual ESRI International User Conference*, San Diego, CA, USA. Retirado de: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-postertnc_18x22.pdf

Yin, K., & Yan, T. (1988) Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In C. Bonnard (Ed.), *Landslides: Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides* (pp. 1269-1272). International Symposium on Landslides.

Zbyszewski, G., & Assunção, C. T. (1965). *Notícia explicativa da folha 30-D (Alenquer)*. Carta Geológica de Portugal (1:50 000). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

Zêzere, J. L. (1988). *As costeiras a Norte de Lisboa. Dinâmica de vertentes e cartografia geomorfológica* [The North of Lisbon hogbacks. Slope dynamics and geomorphological cartography]. [Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa].

Zêzere, J. L. (2001). *Distribuição e Ritmo dos Movimentos de Vertente na Região a Norte de Lisboa*. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos.

Zêzere, J. L., Trigo, R. M., & Trigo, I. F. (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. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-331-2005>

Zêzere, J. L., Oliveira, S. C., Garcia, R. A. C., & Reis, E. (2008). Weighting predisposing factors for shallow slides susceptibility assessment on the regional scale. In Z. Chen, J.-M. Zhang, K. Ho, F.-Q. Wu & Z.-K. Li (Eds.), *Landslides and Engineered Slopes: From the Past to the Future* [Volume 2] (pp. 183-1837). London: Taylor & Francis Group.

Zêzere, J. L., Pereira, S., Tavares, A. O., Bateira, C., Trigo, R. M., Quaresma, I., Santos, P. P., Santos, M., & Verde, J. (2014). DISASTER: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Natural Hazards*, 72, 503-532. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1018-y>

Zêzere, J. L., Vaz, T., Pereira, S., Oliveira, S. C., Marques, R., & Garcia, R. (2015). Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art. *Environmental Earth Sciences*, LXXIII(6), 2917-2936. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3672-0>

Zêzere, J. L., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S. C., & Garcia, R. A. C. (2017). Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of the Total Environment*, 589, 250-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.188>

Zêzere, J. L. (2020). The North of Lisbon Region – A Dynamic Landscape. In G. Vieira, J. L. Zêzere, & C. Mora (Eds.), *Landscapes and Landforms of Portugal* (pp. 265-272). Springer Nature Switzerland AG.

Zhao, M., Sun, Z., & Zeng, Y. (2020). Exploring urban risk reduction strategy based on spatial statistics and scenario planning. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121668>

Zhou, Y., Liu, Y., Wu, W., & Li, N. (2015). Integrated risk assessment of multi-hazards in China. *Natural Hazards*, 78, 257-280. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1713-y>