

RAONI BRAGA AZEREDO

**SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS E INUNDAÇÕES EM CONDIÇÕES DE
ESTACIONARIEDADE E NÃO-ESTACIONARIEDADE DAS CHUVAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A993s
2024

Azeredo, Raoni Braga, 1988-
Susceptibilidade a deslizamentos e inundações em
condições de estacionariedade e não-estacionariedade das chuvas
/ Raoni Braga Azeredo. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (83 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Gabrielle Ferreira Pires.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Referências bibliográficas: f. 76-83.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.439>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Extremos climáticos. 2. Precipitação (Meteorologia) -
Variabilidade. 3. Inundações. 4. Deslizamentos (Geologia).
I. Pires, Gabrielle Ferreira, 1987-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 551.5772815


RAONI BRAGA AZEREDO

SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS E INUNDAÇÕES EM CONDIÇÕES DE ESTACIONARIEDADE E NÃO-ESTACIONARIEDADE DAS CHUVAS


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **RAONI BRAGA AZEREDO**
Data: 02/08/2024 12:07:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raoni Braga Azeredo
Autor

Documento assinado digitalmente
 **GABRIELLE FERREIRA PIRES**
Data: 02/08/2024 14:59:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabrielle Ferreira Pires
Orientadora

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador.

À minha mãe Denizi, ao meu pai Onésimo, à minha tia Vera, à minha avó brasileira e ao meu irmão Dimitri e prima Fernanda, por me criarem e acompanharem nessa jornada.

À minha companheira Vera, que me indicou este caminho, ainda em tempos de pandemia, e me apoiou em todo o percurso.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, pelos conhecimentos transmitidos.

À minha orientadora, Gabrielle Ferreira Pires, pelo exemplo de Perseverança, Profissionalismo e ser Humano com “P” e “H” maiúsculos, por tudo.

À Graça, por ser meu primeiro contato com a instituição e não poderia ser mais querida.

Aos irmãos de satélite do grupo de pesquisa CLIMAP e do DEA por serem quem são; em especial, ao grande Humberto, pela parceria e companheirismo imprescindíveis para o alcance dessa vitória.

À minha bicicleta, por ter aguentado o atropelamento e até hoje me levar por toda parte; e ao meu computador, sempre a postos, mesmo nos dias mais quentes.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, grato a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Ciência é força que nos abre a janela para as leis e relações da existência”.

(Aleksandr I. Herzen)

RESUMO

AZEREDO, Raoni Braga, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Susceptibilidade a deslizamentos e inundações em condições de estacionariedade e não-estacionariedade das chuvas.** Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

Extremos climáticos vem se tornando uma preocupação crescente no Brasil. O país, que acumula um prejuízo de mais de 500 bilhões de reais, desde 1991 a 2022, em função de fenômenos do tipo, sem mencionar a perda de vidas, lida com inundações e deslizamentos nas regiões de maior concentração demográfica. Este trabalho abarca os fatores que contribuem para este cenário: geológicos, pedológicos, vegetacionais, topográficos, meteorológicos, infraestruturais, naturais e antrópicos. Por meio do Método de Análise Hierárquica (AHP) e do refino estatístico de dados de chuvas do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) e através de Funções Generalizadas de Valores Extremos (GEV) conduziu-se avaliação da susceptibilidade no contexto da não-estacionariedade das chuvas. Realizou-se ainda um estudo envolvendo as lâminas d'água referentes aos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos. Trata-se de um estudo desenvolvido para a região sudeste brasileira com resultados referentes a inundações e deslizamentos e a susceptibilidade da área de estudo aos respectivos fenômenos. Por fim, conclui-se que a área em susceptibilidade para inundações mostra-se 2,5 vezes maior quando contempla-se o fator da não estacionariedade das precipitações, ao passo que a área de deslizamentos é 8% maior, cobrindo ambas juntas 37,5% das áreas totais do sudeste brasileiro nos diversos períodos de retorno.

Palavras-chave: Eventos extremos. Não-estacionariedade. Inundações. Deslizamentos.

ABSTRACT

AZEREDO, Raoni Braga, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Susceptibility to landslides and flooding under stationary and non-stationary rainfall conditions.** Adviser: Gabrielle Ferreira Pires.

Climate extremes have become a growing concern in Brazil. The country with losses of more than 500 billion reais, from 1991 to 2022, due to phenomena of this type, not to mention the loss of lives, deals with floods and landslides in regions with the highest demographic concentration. This work covers the factors that contribute to this scenario: geological, pedological, vegetational, topographic, meteorological, infrastructural, natural, and anthropogenic. Using the Hierarchical Analysis Method (AHP) and statistical refinement of rainfall data from the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) through Extreme Value Equations (GEV), susceptibility assessment was conducted in the context of non-stationarity of rainfall. A study was also carried out involving water depths referring to return periods between 5 and 1000 years. This is a study developed for the southeastern Brazilian region with results referring to floods and landslides and the susceptibility of the study area to the respective phenomena. Finally, it is concluded that the area susceptible to flooding is 2.5 times larger when considering the factor of non-stationarity of precipitation, while the landslide area is 8% larger, covering both together 37, 5% of the total areas of southeastern Brazil in the different return periods.

Keywords: Extreme events. Non-stationarity. Floods. Landslides.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ocorrências anuais no Brasil de alagamentos, enxurradas, inundações, movimentos de massa e chuvas intensas entre os anos de 1991 e 2022	14
Figura 2 – Estatísticas referentes a óbitos (a) e desabrigados e desalojados (b) em 2022	15
Figura 3 – Panorama geral de atividades realizadas ao longo do projeto.....	20
Figura 4 – Sudeste brasileiro e suas capitais e centros regionais no contexto nacional e sul-americano.....	21
Figura 5 – Representação espacial das áreas com ocorrência de comportamento não-estacionário (em vermelho) e as demais regiões, estacionárias, em branco.....	50
Figura 6 – Análise de tendência de mudança com as áreas a apresentar dinâmica negativa (em vermelho) e as áreas com dinâmica positiva, com Tau em azul.....	51
Figura 7 – Indicador de desvio no sudeste brasileiro, com áreas a indicar zonas correspondentes à GEV 0, 1 e 2	52
Figura 8 – Representações espaciais dos valores de lâmina precipitada nos regimes estacionários e não-estacionários e a diferença entre os valores dos dois regimes	53
Figura 9 – Representação da avaliação dos fatores empregados na AHP para toda a área de estudo para cada fator estudado.....	60
Figura 10 – Representação para os comportamentos estacionário e não-estacionário tanto para deslizamentos quanto para inundações em toda a área de estudo	62
Figura 11 – Avaliação de susceptibilidade referentes às lâminas d'água dos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos para deslizamentos e inundações.....	64
Figura 12 – Índices de susceptibilidade para a região de São Paulo, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário.....	66
Figura 13 – Índices de susceptibilidade para a região de São Paulo, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário (incluídas as comunidades periféricas)	67
Figura 14 – Índices de susceptibilidade para a região da Baixada Fluminense, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário.....	68
Figura 15 – Índices de susceptibilidade para a região da Baixada Fluminense, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário (incluídas as comunidades periféricas)	69
Figura 16 – Índices de susceptibilidade para a região Serrana Fluminense, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário.....	70

Figura 17 – Índices de susceptibilidade para a região de Belo Horizonte, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário.....	71
Figura 18 – Índices de susceptibilidade para a região de Belo Horizonte, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário (incluídas as comunidades periféricas)	72
Figura 19 – Índices de susceptibilidade para a região do Espírito Santo e adjacências, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário.....	73
Figura 20 – Índices de susceptibilidade para a região do Espírito Santo e adjacências, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário.....	74
Quadro 1 – Dados utilizados na execução do projeto, com datas de lançamento, resolução, tipologia e outras informações.....	24
Quadro 2 – Fontes dos bancos de dados listados no Quadro 1	25
Quadro 3 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à classificação litológica	35
Quadro 4 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às províncias e subprovíncias estruturais	36
Quadro 5 – Padrão de processamento de dados das diferentes camadas empregadas ao longo do trabalho	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à declividade.....	26
Tabela 2 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às inundações.....	27
Tabela 3 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à orientação das elevações de relevo (montanhas, morros, colinas etc.)	28
Tabela 4 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes ao uso da terra.....	29
Tabela 5 – Formações vegetais, contatos vegetacionais e gradação correspondente à susceptibilidade	29
Tabela 6 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às classes pedológicas.	31
Tabela 7 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à textura pedológica....	31
Tabela 8 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à distância dos corpos d’água	32
Tabela 9 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à densidade das bacias estudadas.....	33
Tabela 10 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à distância das feições geoestruturais.....	39
Tabela 11 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à distância das vias de transporte	40
Tabela 12 – Exemplo de padrão de amostragem e soma da contagem de 4 dias consecutivos	41
Tabela 13 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à precipitação de 1 e 4 dias.....	42
Tabela 14 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de deslizamentos em cenário estacionário	55
Tabela 15 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de inundações em cenário estacionário	56
Tabela 16 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de deslizamentos em cenário não-estacionário	57
Tabela 17 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de inundações em cenário não-estacionário	57
Tabela 18 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de deslizamentos para a aplicação aos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos	58

Tabela 19 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de inundações para a aplicação aos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos.....	59
Tabela 20 – Gradiente de valores de susceptibilidade.....	61
Tabela 21 – Percentual da área avaliada em risco 6 e superior no sudeste brasileiro para distintos riscos geológicos	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 Área de estudo	21
3.2 Processo analítico hierárquico (AHP).....	22
3.3 Banco de dados.....	23
3.3.1 Dados naturais	26
3.3.1.1 <i>Fatores de topografia.....</i>	26
3.3.1.2 <i>Fatores vegetacionais</i>	28
3.3.1.3 <i>Fatores pedológicos</i>	30
3.3.1.4 <i>Fatores hidrológicos</i>	32
3.3.1.5 <i>Fatores geológicos</i>	33
3.3.2 Dados antrópicos	39
3.3.2.1 <i>Uso do solo.....</i>	39
3.3.2.2 <i>Distância das vias</i>	39
3.3.3 Dados meteorológicos	40
3.3.3.1 <i>As precipitações máximas anuais de 1 e 4 dias</i>	41
3.3.3.2 <i>Tendência de mudança da precipitação máxima diária</i>	42
3.3.3.3 <i>Teste de Mann-Kendall e magnitude da tendência das chuvas extremas.....</i>	43
3.3.3.4 <i>Lâmina de chuva para tempo de retorno</i>	43
3.4 Modelagem da chuva extrema através da função generalizada de valores extremos	43
3.4.1 <i>Modificação da GEV para incluir comportamento não estacionário das chuvas extremas.....</i>	44
3.4.2 <i>Estimativa de parâmetros.....</i>	45
3.4.3 <i>Análise de estacionariedade e escolha de modelo de precipitação extrema</i>	45
3.5 Cálculo de lâmina para precipitações extremas em diferentes períodos de retorno	46
3.6 Processamento de geodados	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Precipitações extremas	50

4.1.1	Análise de tendências de precipitações extremas	50
4.1.2	Modelos de chuvas extremas	51
4.1.3	Estudo dos tempos de retorno das chuvas extremas	52
4.2	Resultados do processo de análise hierárquica (AHP)	54
4.2.1	Processo de análise hierárquica considerando o comportamento estacionário das chuvas extremas	55
4.2.2	Processo de análise hierárquica considerando o comportamento não-estacionário das chuvas extremas	56
4.2.3	Resultados dos fatores para a AHP	59
4.3	Susceptibilidade a inundações e deslizamentos em condições de estacionariedade e não-estacionariedade das chuvas extremas	61
4.4	Avaliação de susceptibilidade a inundações e deslizamentos considerando diferentes períodos de retorno	63
4.5	Estudos regionais	65
4.5.1	São Paulo e adjacências	66
4.5.2	Rio de Janeiro e adjacências	67
4.5.3	Região Serrana Fluminense	69
4.5.4	Belo Horizonte e adjacências.....	71
4.5.5	Espírito Santo e Leste de Minas Gerais	72
5	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS	76

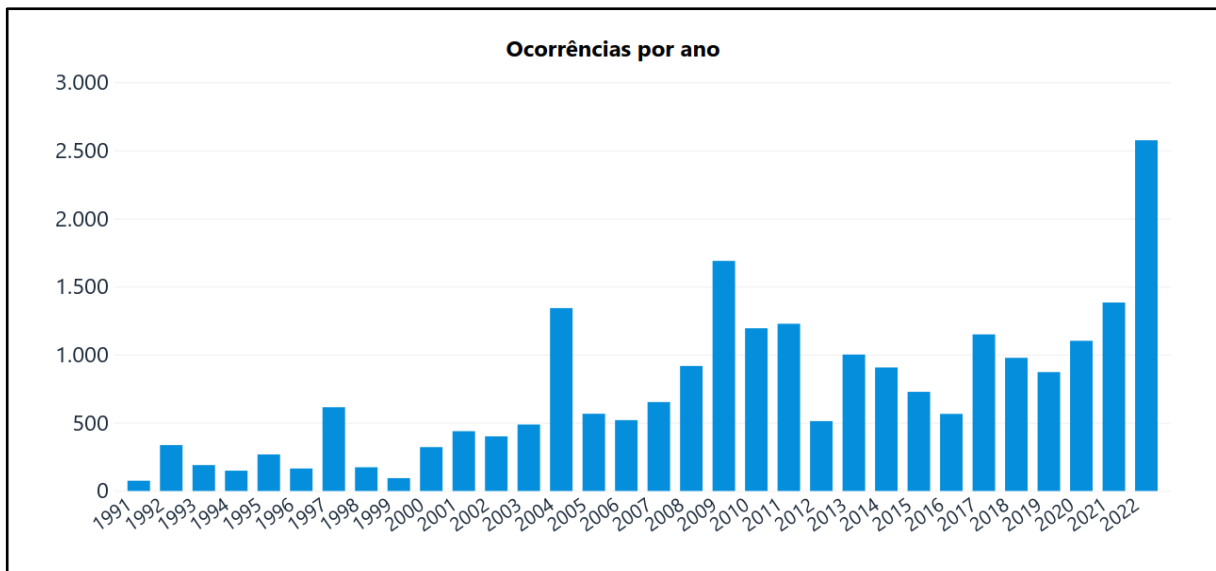
1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de proporções continentais. Com suas dimensões, dispõe de realidades bastante distintas referente à ocorrência de eventos extremos e desastres, particularmente inundações, enchentes e deslizamentos, abordados pelo presente trabalho.

Deslizamento consiste no movimento descendente de rochas, solo e matéria orgânica, assim como a estrutura geomorfológica resultante, sendo este processo sob os efeitos da gravidade (Highland; Bobrowsky, 2008; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). Por sua vez, inundação é o fenômeno que consiste na submersão de determinadas áreas que usualmente não são submersas (Brasil, 2024).

Ao todo, de 2003 a 2022, somam-se mais de 4.200 óbitos, 8 milhões de desalojados, além de quase 500 bilhões de reais em prejuízos dentro de uma dinâmica ascendente de ocorrências anuais (Figura 1), além da quantidade de afetados, conforme demonstrado pelo Atlas Digital de Desastres no Brasil (Brasil, 2023a).

Figura 1 – Ocorrências anuais no Brasil de alagamentos, enxurradas, inundações, movimentos de massa e chuvas intensas entre os anos de 1991 e 2022

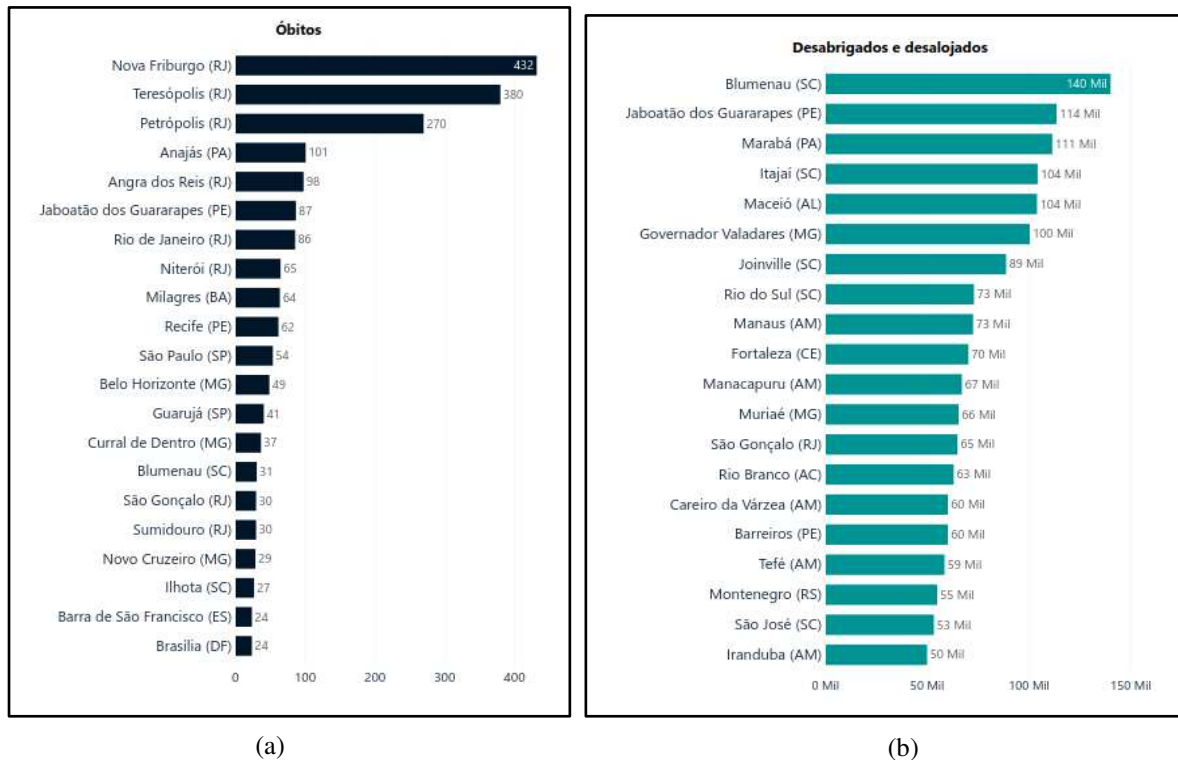


Fonte: Brasil (2023a).

Nesse sentido, destaca-se o sudeste brasileiro, região de estudo deste trabalho, que concentra 14 das 20 cidades com os maiores números de óbitos do país (Figura 2a), em especial os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, onde se destacam os municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis que somados correspondem a mais de 1.000 óbitos em toda a série

histórica. Destaca-se pelo expressivo número de desabrigados e desalojados também os municípios sudestinos, como Governador Valadares, Muriaé e São Gonçalo (Figura 2b).

Figura 2 – Estatísticas referentes a óbitos (a) e desabrigados e desalojados (b) em 2022



Fonte: Brasil (2023a).

Além disso, o sudeste brasileiro se destaca por sua susceptibilidade a eventos de chuvas extremas com sua alta densidade populacional (Aguiar; Cataldi, 2021). Os meses entre novembro e fevereiro se destacam como os de maior alerta, sendo o período de chuvas na região. A título estatístico, entre 1995 e 2016, em que a Zona de Convergência do Atlântico Sul tipicamente se apresenta sobre o Sudeste, 48% dos dias entre outubro e abril apresentam ocorrências de desastres (Aguiar; Cataldi, 2021).

Desastres como inundações e deslizamentos de encostas são geralmente ocasionados por eventos extremos climáticos, de ocorrência rara, quando comparados a outros ambientes de maneira geral, mas em uma localidade específica durante um período específico (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, 2023). Por outro lado, pode-se verificar em um cenário de mudanças climáticas o aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos que persiste ao longo de décadas (IPCC, 2014, 2023).

Mudanças na probabilidade de ocorrência de extremos climáticos advindas de forçantes antropogênicas podem ser examinadas a partir de perspectivas distintas: 1) mudança da

frequência de ocorrência de determinado padrão extremo; ou 2) mudança da magnitude de ocorrência de determinado padrão dentro de certo período de retorno (Kharin *et al.*, 2018; IPCC, 2023). Ressalta-se que a mudança da frequência de ocorrência pode apresentar caráter não-linear, apresentando comportamento exponencial, por exemplo, ao aumentar índices do aquecimento global (Fischer; Knutti, 2015; Kharin *et al.*, 2018; IPCC, 2023).

A ocorrência de chuvas extremas pode ocasionar inundações, referentes à subida no nível da água de determinado curso, fazendo com que determinada área, normalmente seca, seja submersa (Brasil, 2024). Podem ocasionar, ainda, deslizamentos, referentes ao movimento de queda de solo e/ou rocha sob a força da gravidade, seja pelo rompimento da estrutura de taludes, escorregamento de barreiras, dentre outros (Brasil, 2024).

Leroueil *et al.* (1996) propõem quatro estágios de desenvolvimento dos movimentos de massa: 1. Estágio pré-ruptura, considera os processos de deformações com potencial de levar à ruptura; 2. Estágio de ruptura, mais expressivo, é caracterizado pelo cisalhamento por uma superfície do solo; 3. Estágio pós-ruptura, engloba até a parte final da movimentação, com um aumento da razão de deslocamento, com a redução gradual da velocidade e, por fim, 4. Estágio de reativação, ocorre com um novo evento de deslizamento de massa pela superfície de cisalhamento pré-existente (Cruden; Varnes, 1996).

No estudo desses fenômenos nota-se uma tendência em se tomar uma abordagem referente às tendências presentes e futuras de eventos climáticos extremos para além dos estudos de médias estatísticas na climatologia (Bürger *et al.*, 2012; Alexander; Arblaster, 2017; Avila-Diaz *et al.*, 2020).

Deslizamentos e inundações se dão em respostas a extremos meteorológicos que ocorrem com frequência definida por comportamentos intrínsecos ao sistema climático, que são descritos em séries históricas de diferente magnitude de precipitações e períodos de retorno, podendo se dar em constantes estatísticas conhecidas, tratadas como comportamento estacionário por sua alta previsibilidade. Por outro lado, forçantes antropogênicas podem levar ao comportamento não-estacionário das chuvas, de preditividade mais complexa, onde se tem um aumento (ou redução) de precipitações bem acima do previamente esperado para diferentes períodos de retorno.

Cortez *et al.* (2022) apontam que 17,5% do território brasileiro apresenta valores de precipitação diária subestimados ao não se considerar a não-estacionariedade e sua influência sobre os períodos de retorno. Os autores indicam que a máxima precipitação diária pode apresentar aumento de valores em ao menos 90% do território brasileiro no futuro, independente do cenário climático, inclusive nas áreas mais populosas do Brasil, onde a infraestrutura urbana

pode estar vulnerável (Cortez *et al.*, 2022). Este comportamento tem o potencial de aumentar a ocorrência e susceptibilidade associados a desastres, como inundações e deslizamentos, fazendo-se necessária a inclusão do comportamento não-estacionário das chuvas para proteger as populações vulneráveis a estes eventos.

Para estudos de precipitações extremas, comumente este padrão é descrito através da Teoria de Valores Extremos, que inclui a possibilidade, através das Equações Generalizadas de Valores Extremos (do inglês, GEV) de representação de comportamentos não-estacionários decorrentes da influência das mudanças climáticas sobre fenômenos hidrometeorológicos (Xavier *et al.*, 2020; Cortez *et al.*, 2022). Estes estudos, realizados através das GEVs, podem ser uma formidável ferramenta para estudar a evolução no espaço e tempo e a interrelação entre variáveis aleatórias e o clima (Katz; Parlange; Naveau, 2002; El Adlouni *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2014; Gonzalez-Alvarez *et al.*, 2018; Xavier *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Cortez *et al.*, 2022).

Dessa forma, eventos extremos no sudeste brasileiro já influenciam a dinâmica e o cotidiano da região e tendem a influenciar ainda mais, sendo de grande necessidade conhecer mais a fundo e identificar melhor os riscos à região. Embora já exista uma primeira iniciativa de quantificar a susceptibilidade a deslizamentos de terra no Brasil (IBGE, 2019), nota-se que essa abordagem pode ser aprimorada. Ocorre que uma vez que não contemple aspectos como a não-estacionariedade das precipitações, conceitos como tempo de retorno, assim como o uso do solo e outras variáveis meteorológicas, a que pese a diversidade de dados que abrange (geomorfologia, pedologia, litologia etc.) ela pode subestimar os valores de susceptibilidade a desastres.

Por fim, este trabalho avança como uma nova abordagem no mapeamento e avaliação tanto qualitativa quanto quantitativa de zonas de susceptibilidade a inundações e deslizamentos ao contemplar distintos fatores de cunho natural ou antrópico com um diferencial específico: o peso do fator meteorológico, com destaque para a não-estacionariedade, como um agente capaz de influenciar de maneira definitiva a susceptibilidade de zonas a desastres. Nota-se que a maioria dos trabalhos, nominalmente o IBGE (2023) e Dhungana *et al.* (2023) consideram fatores naturais e antrópicos, geológicos, pedológicos etc. No entanto, destaca-se que, ao trabalhar com os dados meteorológicos, muitos limitam-se a avaliações das médias de precipitação, quando o tratamento de dados de máximas fornece resultados mais interessantes, se estabelecendo como uma tendência nos últimos anos (Bürger *et al.*, 2012; Alexander; Arblaster 2017; Avila-Diaz *et al.*, 2020). Este trabalho poderá ser útil como eventual fonte de

informações para agentes decisores tanto no âmbito governamental quanto pela iniciativa privada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva a análise de susceptibilidade de inundações e deslizamentos no sudeste brasileiro em condições de não-estacionariedade das chuvas.

2.2 Objetivos específicos

Especificamente, pretende-se:

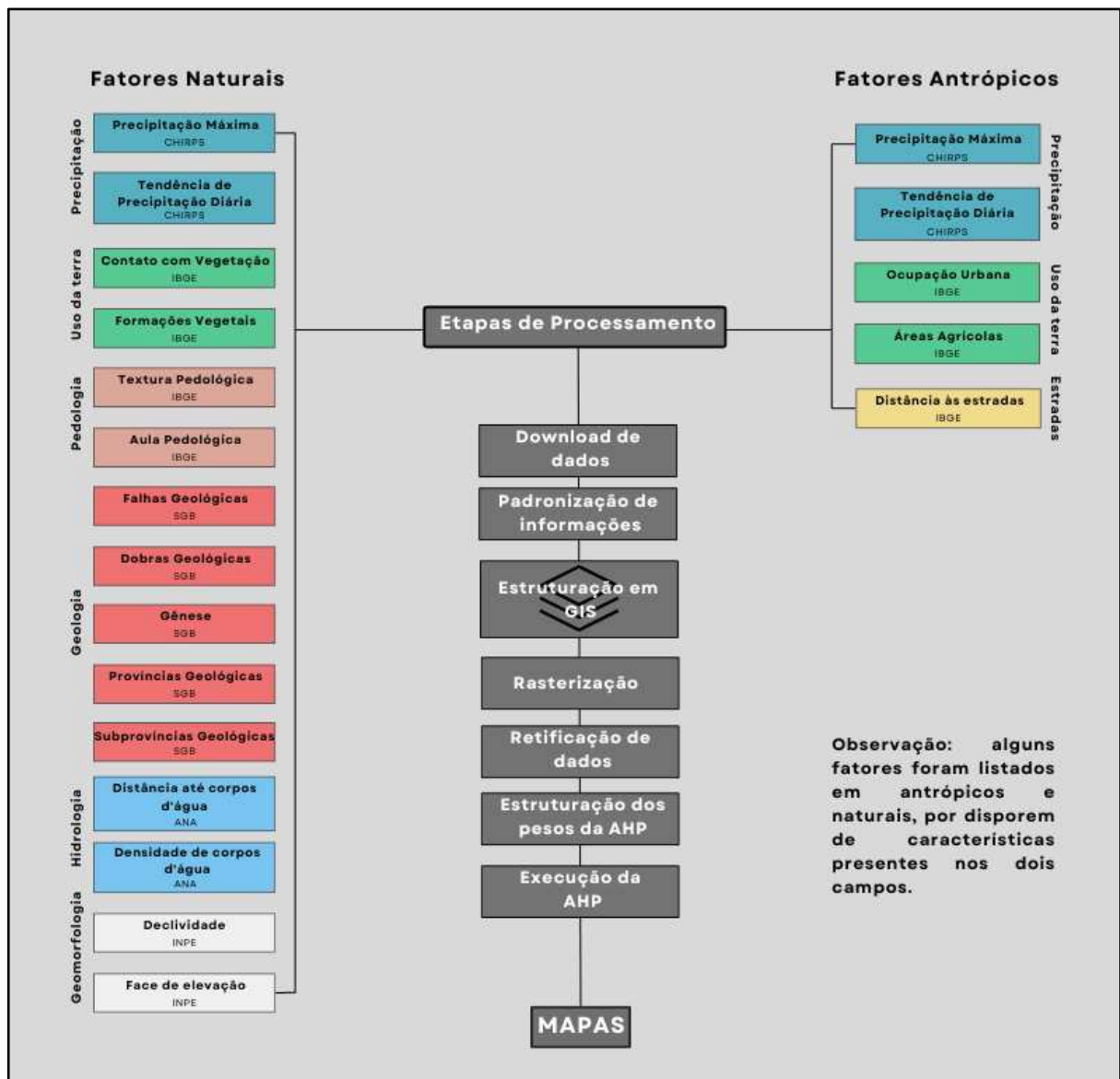
- Estruturar os bancos de dados referentes a:
 - Dados naturais: dados vegetacionais, de topografia, pedologia, hidrologia e geologia.
 - Dados antrópicos: uso de solo, distâncias de rodovias.
 - Dados meteorológicos: a média dos indicadores máximos de precipitação, indicador Mann-Kendall.
- Realizar a modelagem de chuvas extremas em condições de estacionariedade e não-estacionariedade para o sudeste brasileiro;
- Calcular a lâmina de chuva máxima para os seguintes períodos de retorno: 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos com estruturação dos respectivos resultados;
- Configurar e executar o Processo Hierárquico Analítico (do inglês, AHP), calculando a segmentação da susceptibilidade nas condições estacionárias e não-estacionárias
- Comparar a susceptibilidade de deslizamento e inundação entre condições estacionárias e não-estacionárias.

3 METODOLOGIA

O trabalho consiste na identificação de diversos fatores que desempenham papel relevante na ocorrência de deslizamentos e inundações, criando um banco de dados com essas informações em *Sistemas de Informações Geográficas (GIS)*, subsequentemente padronizadas e submetidas a um processo analítico hierárquico, através do qual foram gerados mapas de susceptibilidade.

A Figura 3 mostra o panorama geral de atividades executadas ao longo do trabalho. As atividades serão descritas nas seções seguintes.

Figura 3 – Panorama geral de atividades realizadas ao longo do projeto

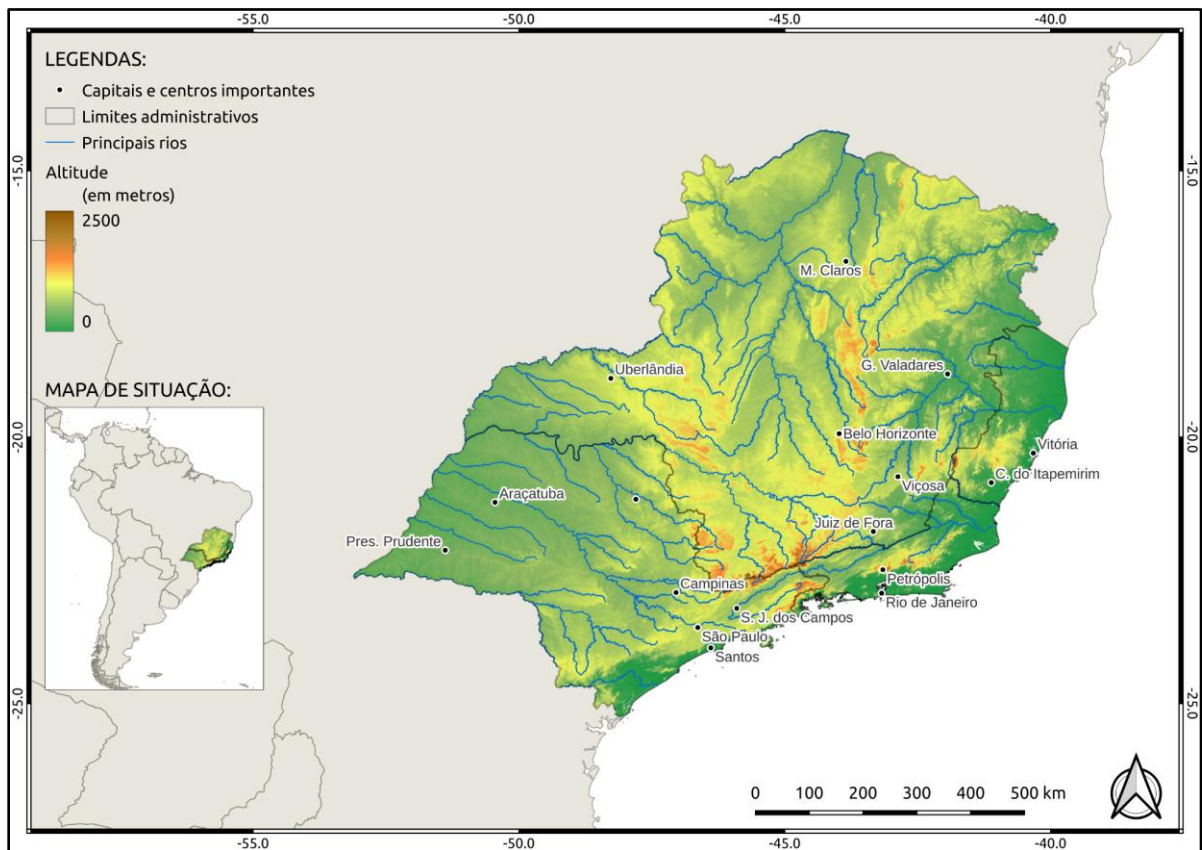


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho trata-se do sudeste brasileiro (Figura 4). Composta por quatro estados (Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo), a região se destaca por sua topografia acidentada nas regiões de maior densidade demográfica, englobando ao todo 41,8 milhões de habitantes (IBGE, 2023). Dispõe de três dos maiores núcleos metropolitanos do país, sendo eles a grande São Paulo, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, além da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Figura 4 – Sudeste brasileiro e suas capitais e centros regionais no contexto nacional e sul-americano



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

No Brasil, a região Sudeste se destaca com diversas áreas, sobretudo urbanas, suscetíveis aos impactos de distintos riscos: nominalmente chuvas extremas, deslizamentos e inundações. Ao todo, o Sudeste reúne mais de 4,2 milhões de pessoas em vulnerabilidade (IBGE, 2018). A região contém 12 dos 20 municípios do Brasil com maior número de moradores em domicílios particulares em áreas de risco a desastres (IBGE, 2018). Destaca-se,

ainda, por concentrar a maioria da população em áreas de risco justamente em locais de geologia e topografia bastante vulneráveis, como regiões montanhosas de declividade bastante acentuada e geologia propensa a deslizamentos.

3.2 Processo analítico hierárquico (AHP)

A *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma teoria de medição por meio de comparações entre pares e dependente dos julgamentos de especialistas para derivar escalas de prioridade (Saaty, 1980). Desenvolvida por Thomas L. Saaty em 1972, trata-se de uma maneira de se considerar diversos fatores para a avaliação de cenários e a posterior tomada de decisões. Muitos estudos avaliando desastres e questões geoambientais podem ser encontrados na literatura (Dai *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004; Chen; Yeh; Yu, 2011; Bathrellos *et al.*, 2012; Chang; Chao, 2012; Tsai *et al.*, 2012; Nefeslioglu *et al.*, 2013).

Baseado em encontrar uma classificação para um determinado problema, se visa estabelecer uma estrutura hierárquica de níveis de relevância para os diversos fatores que compõem a análise dentro de determinado contexto. Este processo é realizado por meio de, definido o campo do conhecimento com o qual se propõe trabalhar, formular uma comparação utilizando uma base numérica normalmente de 1 a 10, onde quanto maior o número, maior é a importância dele no sistema avaliatório em uma estrutura que contempla determinado objetivo seguindo diferentes critérios que dependem dos fatores a serem analisados.

É a partir de então que se constrói as matrizes representantes dos níveis de prioridades entre cada fator, sendo conduzido um processo de padronização de dados, baseado no trabalho Susceptibilidade a Deslizamentos no Brasil (2019) para a maioria dos fatores, tendo sido outros baseados em Dhungana *et al.* (2023).

A padronização é elaborada de modo a evitar possíveis anomalias. Esse sistema hierárquico é então combinado em níveis de prioridade. Caso a hierarquização seja realizada sem um bom embasamento, é possível identificar, por existir a Razão de Consistência, um indicador capaz de mensurar o quão consistente é a hierarquia estabelecida. Trata-se de uma abordagem bastante sólida, existindo, no entanto, certo grau de subjetividade da parte da seleção dos decisores.

Em suma, o método se mostra bastante versátil por ser intuitivo, simples, de fácil compreensão, permitindo combinar diferentes fatores e natureza por vezes intangível, fornecendo escalas para mensurar esses fatores, com a possibilidade de se verificar a

consistência das respostas, além de poder ser realizados por diversos decisores sem a necessidade de um treinamento específico.

Nesse sentido, após a padronização, foi realizado o Método de Análise Hierárquica, em que se visou estabelecer valores-base para cenários considerando os comportamentos estacionários e não-estacionários para cenários de inundações e deslizamentos.

Após isso, foi incluído então os períodos de retorno e os comportamentos tanto estacionários quanto não-estacionários, rendendo resultados descritos nos itens 4.4, 4.5 e 4.6 deste trabalho.

3.3 Banco de dados

Os dados empregados no desenvolvimento deste trabalho foram agrupados em três tipificações (Quadros 1 e 2): natural/físico, para fatores relacionados a aspectos da geografia física, geologia e vegetação; antrópico, para fatores relacionados à atividade humana; e meteorológicos, que podem estar direta ou indiretamente relacionados às duas tipificações previamente citadas, contendo o elemento meteorológico como predominante. Diversos fatores foram baseados na publicação *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019). No entanto, foram incluídos outros com vistas a uma visão mais ampla e agregando uma complexidade maior de fatores ao se incluir não apenas variáveis da litosfera, como também distintos fatores e estudos da meteorologia, então ausentes em trabalhos do gênero. Foram ao todo 20 fatores englobando do subsolo à atmosfera e uma certa diversidade de fenômenos presentes neste ambiente.

Os dados do Quadro 1, com suas respectivas fontes, estão disponíveis no Quadro 2.

Quadro 1 – Dados utilizados na execução do projeto, com datas de lançamento, resolução, tipologia e outras informações

Nº	Tipo de dados	Descrição	Lançamento	Resolução	Tipificação
1	Declividade	Baseado no modelo SRTM via INPE	2000	30 m	Natural/físico
2	Contatos de vegetação	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Natural/físico
3	Formações vegetacionais	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Natural/físico
4	Textura pedológica	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Natural/físico
5	Classe pedológica	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Natural/físico
6	Distância dos corpos d'água	Arquivo buffer derivado de camada tracejada (ANA)	2020	30 m	Natural/físico
7	Densidade de drenagem	Arquivo em formato de camada poligonal (ANA)	2017		Natural/físico
8	Faces de exposição	Baseado no modelo SRTM via INPE	2000	30 m	Natural/físico
9	Falhas geológicas	Arquivo buffer derivado de camada tracejada via IBGE	2021	1 km	Natural/físico
10	Dobras geológicas	Arquivo buffer derivado de camada tracejada	2021	1 km	Natural/físico
11	Gênese	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Natural/físico
12	Províncias geológicas	Arquivo em formato de camada poligonal	2019	1 km	Natural/físico
13	Subprovíncias	Arquivo em formato de camada poligonal	2019	1 km	Natural/físico
14	Ocupação urbana	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Antrópico
15	Áreas agráveis	Arquivo em formato de camada poligonal	2021	1 km	Antrópico
16	Distância das vias de transporte	Arquivo buffer derivado de camada tracejada	2016	1 km	Antrópico
17	Média das máximas entre 1985-2021 entre 1 e 4 dias	Raster baseado nos dados do CHIRPS	1985 - 2021	5 km	Meteorológico
18	Tempos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos	Raster baseado nos dados do CHIRPS	1985 - 2021	5 km	Meteorológico
19	Locais de quebra da tendência "tau"	Raster baseado nos dados do CHIRPS	1985 - 2021	5 km	Meteorológico
20	Direção de tendência para o sudeste	Raster baseado nos dados do CHIRPS	1985 - 2021	5 km	Meteorológico
21	Favelas e comunidades urbanas	Arquivos em formato de camada poligonal	2021	30 m	Antrópico

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Quadro 2 – Fontes dos bancos de dados listados no Quadro 1

Número	Tipo de dados	Fonte
1	Declividade	http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/
2	Contatos de vegetação	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/3b3c686e-8c91-41d8-94aa-dd861461f0b0/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
3	Formações vegetacionais	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/3b3c686e-8c91-41d8-94aa-dd861461f0b0/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
4	Textura pedológica	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/78aca02d-7198-43a0-ae23-b4d7b416553e/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
5	Classe pedológica	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/78aca02d-7198-43a0-ae23-b4d7b416553e/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
6	Distância dos corpos d'água	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/2fb4464c-fc83-41d0-b63a-d020395a4a9
7	Densidade de drenagem	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/2fb4464c-fc83-41d0-b63a-d020395a4a99
8	Faces de exposição	http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/
9	Falhas geológicas	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/71c0713d-6d72-48a3-a8b7-a26b2ab23775
10	Dobras geológicas	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/71c0713d-6d72-48a3-a8b7-a26b2ab23775
11	Gênese	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/21b282cb-42e6-4cf3-975d-76b71178dbb0/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
12	Províncias geológicas	https://ibge.gov.br/apps/macrocaraacterizacao/#/home
13	Subprovíncias	https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/24252-macrocaraacterizacao-dos-recursos-naturais-do-brasil.html?edicao=28282&t=acesso-ao-produto
14	Ocupação urbana	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/3b3c686e-8c91-41d8-94aa-dd861461f0b0/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
15	Áreas agráveis	https://metadadosgeo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/catalog.search#/metadata/3b3c686e-8c91-41d8-94aa-dd861461f0b0/formatters/xsl-view?root=div&view=advanced
16	Distância das vias de transporte	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ff37f924-e88d-4ee4-82e7-14a3e5efe0fd
17	Média das máximas entre 1985-2022 entre 1 e 4 dias	https://earlywarning.usgs.gov/fews/datadownloads/Global/CHIRPS%202.0
18	Tempos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos	https://earlywarning.usgs.gov/fews/datadownloads/Global/CHIRPS%202.0
19	Locais de quebra da tendência "tau"	https://earlywarning.usgs.gov/fews/datadownloads/Global/CHIRPS%202.0
20	Direção de tendência para o sudeste	https://earlywarning.usgs.gov/fews/datadownloads/Global/CHIRPS%202.0
21	Favelas e comunidades urbanas	https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/15788-favelas-e-comunidades-urbanas.html?=&t=downloads

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.3.1 Dados naturais

Os dados considerados naturais compõem o ambiente físico na natureza, independente das atividades antrópicas. Envolve desde a vegetação às províncias geológicas, subdivididos em cinco fatores, que se complementam com os demais grupos. A relevância da escolha destes fatores é explicada a seguir:

3.3.1.1 Fatores de topografia

A **declividade** se destaca como um dos principais aspectos na ocorrência tanto de deslizamentos quanto de inundações, porém de maneira inversa. *A priori* deslizamentos somente ocorrem onde há declividade para o movimento de massa, por outro lado, inundações tendem a ocorrer justamente onde a declividade se apresenta menor, possibilitando o acúmulo ou retenção da lâmina d'água escoada. Cabe ressaltar que o fator declividade esteve presente nos estudos em *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019) e sua gradação de valores foi extraída a partir deste trabalho (Tabela 1).

Tabela 1 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à declividade

Classes de declividade	Declividade (%)	Gradação de susceptibilidade
Plano	0 - 3	1
Suave-ondulado	3 - 8	3
Ondulado	8 - 20	5
Forte-ondulado	20 - 45	8
Montanhoso	45 - 75	9
Escarpado	> 75	10

Fonte: IBGE (2019).

Para **inundações** realizou-se a inversão de parâmetros, com os maiores valores correspondendo às áreas planas, retentoras dos volumes precipitados, e menores, a terrenos escarpados, mais acidentados e menos suscetíveis ao acúmulo do volume precipitado na forma de alagamentos ou inundações (Tabela 2).

Tabela 2 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às inundações

Classes de declividade	Declividade (%)	Gradação de susceptibilidade
Plano	0 - 3	10
Suave-ondulado	3 - 8	9
Ondulado	8 - 20	8
Forte-ondulado	20 - 45	5
Montanhoso	45 - 75	3
Escarpado	> 75	1

Fonte: IBGE (2019).

Outro fator de relevância, sobretudo a nível local, é a Face de Exposição. Estando no Hemisfério Sul, elevações tendem a ser mais iluminadas pelo lado norte, seguido pelo oeste, leste e sul. Faces de Exposição desempenham um papel muito importante na forma como influenciam aspectos microclimáticos como radiação solar, exposição da declividade ao vento e outros agentes, precipitações, que por sua vez influenciam a umidade de solo e o crescimento da vegetação local e, de maneira indireta, a ocorrência de deslizamentos de terra (Guzzetti *et al.*, 1999; Dai; Lee, 2002; Demir *et al.*, 2013; Dou *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2019; Dhungana *et al.*, 2023).

A título de inundações as consequências são desprezíveis. Porém, em deslizamentos, essa condição pode desempenhar um papel decisivo. Regiões com grande ocorrência de vales, como ocorre na zona de Mares de Morro, presente em boa parte do sudeste brasileiro, ou em maciços rochosos, como a Serra dos Órgãos ou do Itatiaia, podem ser afetadas por este fator. Nesses locais pode-se ter a formação de microclimas, especialmente devido à diferença da incidência solar, em que as encostas voltadas para o sul tendem a apresentar maior umidade de solo, menor tempo sob luz solar, além de uma tendência de apresentar uma vegetação diferenciada quando comparado à face norte. Com mais água no sistema, tende a ser mais propensa a deslizamentos. No entanto, em *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019), este fator não foi considerado.

Nesse sentido, optou-se por avaliar com o maior risco (gradação 10 na Tabela 3) justamente a face sul menos iluminada e mais úmida, ao passo que a norte foi apontada como a de menor risco (gradação 1), mais iluminada e seca.

Tabela 3 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à orientação das elevações de relevo (montanhas, morros, colinas etc.)

Classes frontais	Gradação de susceptibilidade
Norte	1
Leste	6
Sul	10
Oeste	4

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.3.1.2 Fatores vegetacionais

Envolvendo toda uma diversidade de biomas, a vegetação desempenha uma importante função na estabilização do solo. Nesse aspecto, baseado no trabalho de *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019), foram identificados dois campos distintos:

- **Formações vegetacionais:** envolvendo florestas ombrófilas (densas, abertas, mistas), estacionais, savanas, estepes etc.
- **Contatos vegetacionais:** caracterizam os contatos entre as formações supracitadas, uma vez que a faixa de transição entre uma vegetação e outra se dá de maneira gradual, com intensidade diversa e com mudanças de diferentes parâmetros (micrometeorológicos, botânicos, biomorfológicos etc.).

Ambos os critérios se relacionam à ocupação do solo e, portanto, foram compilados e processados em conjunto, inclusive, com alguns fatores antrópicos, como áreas urbanas e ocupadas pela atividade agrícola. Formações como afloramentos, solo exposto e semelhantes foram considerados áreas descobertas.

Ocorre que as Formações Vegetais e os Contatos Vegetacionais, de cunho natural, apresentam grau de susceptibilidade a depender da cobertura vegetal em questão (Tabelas 4 e 5). A gradação das formações vegetais, dos contatos vegetacionais, assim como de cobertura e uso da terra empregada tem como fonte o trabalho de *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019). Esses dados se relacionam a deslizamentos.

Tabela 4 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes ao uso da terra

Classes de cobertura e uso da terra	Gradação de susceptibilidade
Vegetação florestal	1
Vegetação campestre/Área úmida	2
Silvicultura	4
Área descoberta	5
Mosaico de ocupações em área florestal/Mosaico de ocupações em área campestre	6
Pastagem com manejo	8
Área agrícola	9
Área artificial	10

Fonte: IBGE (2019).

Tabela 5 – Formações vegetais, contatos vegetacionais e gradação correspondente à susceptibilidade

Formação vegetal	Gradação de susceptibilidade
Floresta Ombrófila Densa	1,1
Floresta Ombrófila Aberta	1,2
Floresta Ombrófila Mista	1,2
Contatos vegetacionais	
Estepe-Floresta Ombrófila Mista (EM)	1,9
Estepe-Floresta Estacional (EN)	1,8
Estepe-Formações Pioneiras (EP)	2,9
Campinarana-Floresta Ombrófila	1,5
Floresta estacional-Floresta mista	1,3
Floresta estacional-formações pioneiras	1,6
Floresta ombrófila-Floresta mista	1,2
Floresta ombrófila-Floresta estacional	1,3
Floresta ombrófila-formações pioneiras	1,5
Savana-Floresta Ombrófila Mista	1,4
Savana-Floresta Estacional	1,5
Savana-Floresta Ombrófila	1,3
Savana-Formações Pioneiras	2,5
Savana-Savana Estépica	2,6
Savana-Floresta Estacional Savana Estépica	1,7
Savana Estépica-Floresta Estacional	1,6
Savana Estépica-Floresta Ombrófila	1,5
Savana Estépica-Formações Pioneiras	2,9

Fonte: IBGE (2019).

A densidade das árvores, das raízes, o tipo de bioma em questão, além de outros fatores atuam para a construção de uma maior vulnerabilidade ou resiliência do ambiente em que estão, conforme a natureza da vegetação. É de se esperar, por exemplo, que uma região de cultivo agrícola de milho, em área com desnível, seja mais suscetível a deslizamentos do que a mesma região, com o mesmo desnível, coberta por uma floresta ombrófila fechada.

Os parâmetros empregados para a classificação das formações foram semelhantes ao utilizado por IBGE (2019).

3.3.1.3 Fatores pedológicos

O solo desempenha um papel chave em desastres. Podendo ser considerado para os fins do estudo como material inconsolidado na superfície da terra (Terzaghi; Peck, 1967) e com natureza distinta em termos de porosidade, permeabilidade, textura ou geoquímica, solos podem conferir maior ou menor vulnerabilidade ao local. Se destaca ainda por refletir uma maior ou menor propensão a movimentos de massa (Liu *et al.*, 2019; Dhungana *et al.*, 2023).

Fatores como clima, pedogênese, topografia, tempo de formação e evolução afetam características pedológicas (Sing; Huat, 2012; Amarasinghe *et al.*, 2023). A abordagem de *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019) avalia características referentes à infiltração e condutividade hidráulica do solo, a dispersão da argila (ponto que funciona como gatilho em deslizamentos) além de aspectos como profundidade, textura, relação estrutural, que se encaixam na classificação taxonômica.

Cabe notar que formações de solo profundamente alteradas, aquíferos profundos e zonas espessas sem saturação afetam a estabilidade do solo (Lee *et al.*, 2014). Localmente alguns receberam uma avaliação menor, devido à baixa evolução pedogenética do solo em questão.

Em linhas gerais, os solos foram divididos em quatro grupos, sendo eles raso, pouco profundo, profundos e muito profundos, conforme o mapa pedológico de *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019).

Nota-se que a classe do solo desempenha um papel importante em termos de coesão, resistência a forças de atrito, saturação em água, gênese, entre outros fatores. Nesse sentido, conferiu-se a dunas e chernossolos gradações mais propensas a riscos geológicos (gradação 9, Tabela 6), ao passo que latossolos e organossolos receberam avaliações menores (gradação 2).

Tabela 6 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às classes pedológicas

Classes de solo	Gradação de susceptibilidade
Afloramento de rochas	6
Argissolo	9
Cambissolo	9
Espodossolo	6
Gleissolo	4
Latossolo	2
Luvissolo	6
Neossolo	6
Nitossolo	6
Organossolo	2
Planossolo	4
Plintossolo	4
Vertissolo	4
Dunas	9
Chernossolo	9

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

A título da granulometria e teor de cascalhos do solo, as combinações foram contabilizadas, uma vez que são propriedades que se relacionam à porosidade, coesão e consistência do solo, além de interações em escala microscópica (coloides, soluções, trocas eletroquímicas etc.). Dessa forma, solos com maiores teores de silte e/ou cascalho receberam maiores notas para deslizamento, por exemplo.

Outro aspecto considerado foi a relação textural (Tabela 7), ou seja, a relação entre a granulometria presente da fração argila entre os horizontes superiores e a dos horizontes inferiores, formados de maneiras distintas, no solo. É algo importante, uma vez que trata da geometria dos poros, de sua condutibilidade, infiltração e percolação pela água.

Tabela 7 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à textura pedológica

Textura de solo	Gradação de susceptibilidade
Argilosa	0,5
Silto-argilosa	2
Siltosa	4
Silto-arenosa	6
Arenosa	9

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

3.3.1.4 Fatores hidrológicos

O sudeste brasileiro abarca algumas das bacias hidrográficas mais importantes para o país, seja em sua totalidade, como ocorre com o Vale do Paraíba, com seu significado histórico, seja parcialmente, como ocorre com o Vale do São Francisco. Destaca-se que a infiltração da água no solo pode ser considerada o principal fator causador da ocorrência de deslizamentos em regiões tropicais e subtropicais por diversos estudos (Fourie, 1996; Rahardjo *et al.*, 1995, 2007; Zhang *et al.*, 2011; Amarasinghe *et al.*, 2023).

Nesse sentido foram considerados dois fatores: 1) Distância dos corpos d'água; e 2) Densidade dos corpos d'água por bacia, aqui tratado como “densidade por bacia”.

A distância dos corpos d'água desempenha um fator de risco considerável durante inundações e é largamente empregado (Van Westen; Castellanos; Kuriakose, 2008; Dhungana *et al.*, 2023). Durante e após chuvas intensas, sobretudo em rios, é comum que as margens sejam inundadas em um determinado entorno, que depende de fatores como a geomorfologia local. Dessa forma, dado que o Sudeste dispõe de uma geomorfologia bastante diversificada, assumiu-se classificar com os maiores índices os entornos em um raio de 100 metros (Tabela 8), ao passo que áreas mais distantes recebem indicadores inferiores. Esse foi um valor definido buscando algo intermediário capaz de atender de maneira geral toda a região estudada, de maneira adaptada à abordagem de outros trabalhos (Dhungana *et al.*, 2023).

Tabela 8 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à distância dos corpos d'água

Distância do corpo d'água (em metros)	Gradação de susceptibilidade
0 - 100	7
> 100	1

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Nota-se que o banco de dados empregados para as bacias hidrográficas difere em termos de qualidade de detalhamento. A base de dados para, por exemplo, o estado de Minas Gerais, dispõe de um grau superior de detalhes quando comparada à do Espírito Santo, que dispõe de certas lacunas. Infelizmente, não foi possível contornar essa situação no sentido de se trabalhar com um banco de dados de qualidade uniforme, por outro lado, os dados disponíveis foram suficientes para fornecer resultados necessários a macro e mesoescala.

Salienta-se que este valor tende a mudar conforme a geomorfologia e os domínios geomorfológicos da área estudada, uma vez que alguns domínios geomorfológicos podem dispor de planícies de inundações extensas a níveis quilométricos.

Outro ponto importante é a relação existente entre o comprimento dos corpos d'água e a área da bacia hidrográfica em questão. Essa é uma abordagem largamente utilizada, assim como a distância dos cursos d'água e outros fatores empregados neste trabalho (Van Westen; Castellanos; Kuriakose, 2008; Dhungana *et al.*, 2023), a exemplo de declividade, uso do solo e outros.

Densidades mais altas indicam um comprimento maior de corpos d'água por bacia, se refletindo, então, em uma maior disponibilidade hídrica local. Por sua vez, isso se reflete a nível subsuperficial, com lençóis freáticos mais saturados, solo potencialmente mais úmidos, além de microclimáticos, com maior umidade do ar e, por fim, maior susceptibilidade a deslizamentos e inundações. Dessa forma, densidades a partir de 3 dispõem da gradação de maior risco (Tabela 9), ao passo que valores baixos de densidade nos indicam menor susceptibilidade, devido à menor influência hídrica local a nível de subsuperfície e microclima.

Tabela 9 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à densidade das bacias estudadas

Densidade (comprimento de curso/área bacia)	Gradação de susceptibilidade
Nulos	1
0 - 1	3
1 - 2	5
2 - 3	8
3 - ∞	10

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.3.1.5 Fatores geológicos

Abarcando desde o subsolo até a morfologia, na superfície, a Geologia se destaca por atuar como um condicionante essencial em movimentos de massa, ao se relacionar com a resistência a movimentos de massa, o que depende da composição das rochas subjacentes (Gemitzi *et al.*, 2011; Vojtekova; Vojtek, 2020; Dhungana *et al.*, 2023). Fatores petrológicos, geoestruturais, topográficos, além das condições de stress locais e o grau de intemperismo

afetam a instabilidade tanto de taludes naturais quanto artificiais (Borelli; Greco; Gulla, 2007; McColl, 2015; Regmi *et al.*, 2013; Amarasinghe *et al.*, 2023). Neste sentido, a litologia oferece boas características de análise referentes aos fatores de desastres. No entanto, é insuficiente, por conta das diversas heterogeneidades presentes nas formações geológicas, conforme suas características genéticas (IBGE, 2019). Devido a isso, os fatores geológicos foram divididos em quatro grupos principais (Gênese; Subprovíncias; Províncias geológicas; e Feições geoestruturais).

Gênese: refere-se não apenas a uma litologia em especial, mas às litologias diversas que podem estar presentes em determinada formação geológica (IBGE, 2019). Salienta-se que em regiões tropicais como a de estudo, além do intemperismo físico, o químico é de ação muito acentuada, alterando a mineralogia e composição química textural das rochas, reduzindo sua tenacidade (Che *et al.*, 2012; Regmi *et al.*, 2014; Amarasinghe *et al.*, 2023). Devido a isso, as características mineralógicas das formações geológicas desempenham um papel importante, mas frequentemente bastante diverso umas às outras no processo de formação de solo, de feições geológicas e, por fim, de susceptibilidade a desastres.

Não seria adequado chamar este campo de litologia (Quadro 3), uma vez que se pode ter determinada litologia com gênese distinta e susceptibilidade igualmente diferente. Podemos citar, por exemplo, as diferenças na formação de granitoides de origem ígnea e metamórfica, ou a grande diferença de graus de metamorfismo entre distintos tipos de xistos e quartzitos (IBGE, 2019). Nesse sentido, a gradação varia diretamente conforme a natureza da gênese da unidade lito-estratigráfica e sua resposta ao intemperismo. Dessa forma, destaca-se nas formações de maior susceptibilidade, as formações rochosas sedimentares químicas e clasto-químicas, a exemplos de rochas carbonáticas como calcários e coquinas, bastante reativas ao intemperismo químico, de baixa coesão e estabilidade estrutural.

Na outra ponta, destacam-se rochas plutônicas ácidas, como granitoides, dispendo de uma firme estrutura cristalina, com abundância de elementos estáveis como o silício e pouco reativos, diferente do que ocorre em rochas máficas. Descontinuidades, como fraturas de acamadamento, muitas vezes inerentes ao corpo rochoso, atuam como fator limitante na instabilização e intemperismo da estrutura rochosa (Amarasinghe *et al.*, 2023).

Quadro 3 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à classificação litológica

Gradação de susceptibilidade	Classificação litológica
10	Rochas sedimentares químicas
9	Rochas sedimentares clasto-químicas
8	Rochas clásticas, piroclásticas e de metamorfismo regional de baixo grau, zonas de cisalhamento
7	Rochas de metamorfismo regional de baixo grau
6	Rochas de metamorfismo regional de grau baixo a médio, metaplutônicas, metassedimentares, metavulcanossedimentares
5	Rochas de contato, de metamorfismo regional de grau médio, vulcânicas básica, ultrabásicas, hipoabissal básica
4	Rochas plutônica ultrabásica, metamórficas de grau médio a alto, vulcânicas ácidas, intermediárias e alcalinas, hipoabissais ácidas e intermediárias
3	Rochas plutônicas intermediárias a básicas
2	Rochas plutônica alcalinas
1	Rochas plutônicas ácidas

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

Rochas metamórficas (quartzitos, filitos, ardósias etc.) se destacam por serem mais suscetíveis a deslizamentos do que as supracitadas, devido a sua deformação de baixa intensidade (Budha; Paudyal; Ghimire, 2016), associadas à formação de foliações, clivagem, juntas e outras estruturas que por fim enfraquecem o maciço rochoso. Nota-se um histórico de deslizamentos de grandes proporções associados tanto a rochas de metamorfismo de alto grau, como gnaisses, quanto a filitos e xistos, litologias típicas de baixo e médio grau (Zadorova; Penizek, 2018; Amarasinghe *et al.*, 2023).

Subprovíncias e Províncias geológicas: referem-se a zonas que registram a história das rochas em agrupamentos litoestratigráficos que partilham da mesma gênese e evolução, tanto no aspecto sedimentar, quanto ígneo e metamórfico (IBGE, 2019). São diversas entre si em inúmeros sentidos, tais como história e eventos geológicos, litologias, geoquímica, dimensão das formações, mas sobretudo no que tange à natureza e a intensidade das deformações a que foram submetidas.

Províncias e subprovíncias geológicas são também registros de processos geotectônicos de grande escala e, inseridas no tempo geológico, marcam os modelos de formação da geomorfologia e topografia, de maneira geral. Consequentemente, representando grande interesse para o presente estudo (Quadro 4).

Quadro 4 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às províncias e subprovíncias estruturais

(continua)

Províncias estruturais	Subprovíncias estruturais
Amazonas-Solimões (4)	Alter do Chão (2) Amazonas (9) Cururu-Penatecaua (2) Içá (1) Moa-Divisor (8) Solimões (4)
Amazônia (5)	Alto Guaporé (1) Bacajá-Tumucumaque-Cauarane (8) Cassiporé (8) Penatecaua (3) Complexos Alcalinos (7) Guiana Central (9) Jaci-Paraná (3) Oiapoque (1) Parima-Tapajós (8) Pau D'Arco (2) Rio Apa (2) Rio Negro-Juruena (8) Serra Arqueada (10) Tacutu (4)
Borborema (7)	Araripe (2) Cachoeirinha (8) Ceará Central (4) Zona Transversal (8) Bacias Interiores (3) Complexos Alcalinos (7) Granja (1) Macau (2) Magmática Pós-Orogênica (10) Martinópolis-Ubajara (10) Paulistana-Monte Orebe (8) Pernambuco-Alagoas (8) Rio Ceará-Mirim (7) Rio Grande do Norte (10) Segipana-Riacho do Pontal (7) Seridó (10)
Coberturas Cenozoicas (1)	Alto Xingu (1) Baixo Tocantins (1) Bananal (1) Barreiras (1) Boa Vista (1) Indiscriminadas (1) Riftes Cenozoicos da Mantiqueira (1) Dunas do São Francisco (1) Guaporé (1) Pantanal (1) Rio Branco-Rio Negro (1)

Quadro 4 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às províncias e subprovíncias estruturais

(continua)

Províncias estruturais	Subprovíncias estruturais
Costeira e Margem Continental (3)	Bacias da Margem Continental (2) Complexo Alcalinos (7) Depósitos Costeiros (1) Foz do Amazonas-Marajó (1)
Gurupi (5)	Gurupi (5)
Mantiqueira (10)	Araçuaí-Rio Doce (10) Curitiba-Luiz Alves-Itajaí (10) Complexos Alcalinos (10) Embu-Rio Negro-Paranapiacaba (10) Pelotas (9) São Gabriel-Camaquã (8)
Paraná (6)	Bauru-Caiuá (2) Complexos Alcalinos (5) Paraná (9) Serra Geral (8) Telêmaco Borba (8)
Parecis (3)	Anari-Tapirapuã (3) Parecis (2) Pimenta Bueno-Casa Branca (5)
Parnaíba (6)	Alpercatas (9) Grajaú (2) Mosquito-Sardinha (3) Parnaíba (10)
Recôncavo-Tucano-Jatobá (3)	Recôncavo-Tucano-Jatobá (3)
São Francisco (6)	Bambuí (5) Espinhaço Meridional (10) Espinhaço-Chapada Diamantina (10) Jequié-Curaçá (3) Quadrilátero Ferrífero (9) Salitre (5) São Franciscana (2) Sobradinho-Paramirim (4)
São Luís (4)	São Luís (4)

Quadro 4 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes às províncias e subprovíncias estruturais

(conclusão)

Províncias estruturais	Subprovíncias estruturais
Tocantins (7)	Araguaia-Tocantins (8) Araí-Serra da Mesa (9) Brasília (10) Corumbá-Alto Paraguai (10) Crixás-Goiás Velho (6) Bacias Interiores (2) Dianópolis (5) Complexos Alcalinos (7) Iporá-Amorinópolis (7) Magmática Pós-Orogênica (1) Mara Rosa (1) Paraguai (8) Porto Nacional-Nova Crixás (2) Socorro-Guaxupé (10)

Fonte: IBGE (2019). Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Banco de Dados de Informações Ambientais - Geologia.

Nota: A numeração entre parênteses representa o grau (1 a 10) atribuído a cada província ou subprovíncia estrutural.

Feições geoestruturais: São subdivididos entre fraturas, falhas e dobras. Trata-se de um fator de papel importante por sua relação positiva juntamente com outros (declividade, face de exposição etc.) na ocorrência de movimentos de massa (Dou *et al.*, 2015; Dhungana *et al.*, 2023). Além disso, estruturas do tipo podem afetar muito significativamente a integridade de maciços rochosos (McColl, 2015; Stead; Wolter, 2015; Amarasinghe *et al.*, 2023).

Tais feições são formadas durante processos geotectônicos com movimentação da matéria, sob pressão e temperatura, como separação de continentes, choque de crátons ou a formação de riftes geológicos. Ao longo do tempo geológico e sob a ação do intemperismo, intrusões e produtos do intemperismo, como argilominerais são capazes de lubrificar os planos de falha e blocos nos rochedos (Cooray, 1994).

Para efeito de processamento, a partir das feições foram criados buffers, cada qual com uma pontuação, dispondo os mais próximos de pontuações mais acentuadas e os mais distantes, de pontuações menores (Tabela 10).

Tabela 10 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à distância das feições geoestruturais

Distância da feição (em metros)	Gradação de susceptibilidade
100	9
300	8
600	7
900	6
1100	5
1300	4
1500	3
1700	2
1900	1
> 1900	1

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.3.2 Dados antrópicos

3.3.2.1 *Uso do solo*

A atividade antrópica é um fator imprescindível a se considerar. O crescimento de cidades (não raramente de maneira desorganizada) a assimilação de grandes áreas do território do sudeste brasileiro pela agricultura, a modificação de cursos d'água e diversos outros aspectos colocam o fator humano como condição decisiva, em escala micro e macro, na mudança do clima.

Ressalta-se que a camada referente ao uso do solo por razões operacionais foi processada unida, porém para a caracterização dos fatores no texto desmembrada. No caso, ela abarca tanto aspectos vegetacionais quanto antrópicos. Ambientes urbanos receberam peso máximo (10), conforme consta na Tabela 3.

3.3.2.2 *Distância das vias*

Neste trabalho, o fator humano foi trabalhado em sua maior parte juntamente com a vegetação, na parte de ocupação do solo. No entanto, foi adicionado ainda outro fator, trata-se da “Distância de Vias” federais e estaduais (Tabela 11). Durante a construção de vias em localidades de topografia acidentada ou relevo montanhoso, é comum que ocorra o

fraturamento dos corpos rochosos no entorno da obra, tornando a estrada mais suscetível a deslizamentos (Donati; Turrini, 2002; Dhungana *et al.*, 2023), além de se tratar de um objeto de infraestrutura de importância, frequentemente utilizados por populações locais ou mesmo no transporte regional/nacional, além de cortarem cidades e representarem de fato um ponto de atenção humana, infraestrutural ou logística.

Tabela 11 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à distância das vias de transporte

Distância da via (em metros)	Gradação de susceptibilidade
100	10
200	7
300	3
> 300	1

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Dessa forma, a partir das estradas foram criados diferentes buffers, cada um com uma pontuação, decrescente, a partir das vias, que receberam peso 10 até as menores notas, já distantes, em valor 1.

3.3.3 Dados meteorológicos

No desenvolvimento deste projeto, foram empregados dados de precipitação provenientes da base de dados do CHIRPS (do inglês, “*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*”), que se trata de um projeto de 1999 elaborado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), Administração Nacional Oceânico Atmosférica (NOAA) no sentido de cobrir áreas até então esparsas com estimativas da variação da precipitação ao longo do tempo (Funk *et al.*, 2015). O projeto se destaca sobretudo por sua cobertura em regiões tropicais do globo. Nesse sentido, atualmente o CHIRPS recobre o intervalo de 1985 a 2022 para estudos estatísticos com cada pixel cobrindo uma malha de 5km x 5km cada e com medições de precipitação diária. Trata-se de um instrumento indicado para latitudes entre 50° sul e norte e todas as longitudes. Dependendo da área é capaz de abarcar dados de 1981 por diante (Funk *et al.*, 2015).

Ressalta-se que as abordagens abaixo não foram empregadas por *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019).

Neste sentido, empregou-se a média das precipitações máximas absolutas anuais, a tendência da chuva máxima diária na região estudada, o teste Mann-Kendall e a lâmina de chuva referente ao tempo de retorno para 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos em condições de não-estacionariedade.

3.3.3.1 As precipitações máximas anuais de 1 e 4 dias

Foi empregado como métrica a análise dos dados meteorológicos de precipitação máxima ao longo de todos os dias desde 1985 a 2022 para toda a área de estudo. Os dados foram processados e gerados dois rasters os valores máximos de cada 1 dia e do somatório de cada 4 dias sequenciais para cada pixel de 5km x 5km em toda a área estudada.

A nível de processamento de dados, os valores referentes a 4 dias foram obtidos através do somatório das precipitações referentes aos dias referidos. Dessa forma, a partir, digamos de 1 de janeiro de 1985, seria contado os três dias consecutivos, até 4 de janeiro, e a partir de então seria feita uma soma, contabilizado um valor para o referido píxel de 5km x 5km de dimensão.

Nota-se que o ano dispõe de 365 dias, a partir do que temos então uma perda de 1 - 3 dias anuais, devido ao processo de compilação e sua limitação no final de dezembro. Isso faz com que os valores de 4 dias tendem a ser naturalmente superiores aos de 1 dia (Tabela 12).

Tabela 12 – Exemplo de padrão de amostragem e soma da contagem de 4 dias consecutivos

Dias	1	2	3	4	5	6	Somatório
	100	50	20	80	30	20	<i>250</i>
Indicadores	100	50	20	80	30	20	<i>230</i>
	100	50	20	80	30	20	<i>150</i>

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Nota: Na linha superior, suposição dos dias amostrados, com seus respectivos valores nas linhas inferiores e, em negrito, os indicadores utilizados na soma de 4 dias, listada na última coluna, em itálico.

A avaliação se baseou nos valores de precipitação divididos, como nos demais fatores entre 0 e 10 (Tabela 13).

Tabela 13 – Padrão de classificação e pontuação dos dados referentes à precipitação de 1 e 4 dias

Precipitação (mm)	Gradação de susceptibilidade
0 – 30	1
30 – 55	2
55 – 75	3
75 – 100	4
100 – 130	5
130 – 150	6
150 – 200	7
200 – 225	8
225 – 300	9
> 300	10

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Após isso, foi selecionado para a geração de um terceiro raster o pixel com o valor maior de cada coordenada dos dois rasters comparados, gerando então um raster final com os valores máximos dos dois rasters iniciais, de 1 e 4 dias de precipitação.

3.3.3.2 Tendência de mudança da precipitação máxima diária

Após isso, foi estabelecido, considerado o comportamento de precipitações ao longo do tempo, a dinâmica de tendências para toda a área de estudo, além das áreas onde essa tendência havia sido quebrada, considerando a malha de dados iniciais de 5km x 5km.

Nesse sentido, cabe lembrar que o alcance dos dados é referente apenas à cobertura do banco de dados, sendo, portanto, possível que outras mudanças anteriores possam ter se dado em áreas estudadas e não identificadas pela abordagem.

Salienta-se, ainda, que os dados referentes à tendência de mudança, o valor Tau, de chuva por dia foram submetidos a uma padronização: uma vez que oscilavam entre +0,55 e -0,55 mm/dia/ano, considerou-se como 0 mm/dia/ano correspondendo ao valor 7 na escala de susceptibilidade e, a partir de então, realizou-se uma gradação onde -0,55 mm/dia/ano corresponde a 0 de valor e +0,55 mm/dia/ano, a 10.

Os resultados referentes a essa parte estão disponíveis no tópico 4.1.1 (Figura 6).

3.3.3.3 Teste de Mann-Kendall e magnitude da tendência das chuvas extremas

Os dados foram processados para identificar a existência de tendências nas precipitações máximas diárias através do teste de Mann-Kendall. A magnitude e o sinal da tendência de chuvas extremas foram estimados através do indicador Sen's slope.

Os resultados referentes a essa parte estão disponíveis no tópico 4.1.2 (Figura 7).

3.3.3.4 Lâmina de chuva para tempo de retorno

Foi ainda contabilizada a lâmina de chuva correspondente a determinados tempos de retorno. Como métrica, utilizaram-se os períodos de 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos. Os valores foram contabilizados tanto para o comportamento estacionário, quanto para o não-estacionário (seção 3.5). Na sequência, foi calculada a diferença entre eles em toda a área de estudo.

Os resultados referentes a essa parte estão disponíveis no tópico 4.1.3 (Figura 8).

3.4 Modelagem da chuva extrema através da função generalizada de valores extremos

A Função Generalizada de Valores Extremos (GEV) é capaz de estimar a frequência de ocorrência de chuvas extremas em cenários de estacionariedade e não-estacionariedade. GEVs são empregadas em séries de dados máximos anuais, como os de precipitação (Katz; Parlange; Naveau, 2002; Ouarda; Charron, 2019; Cortez *et al.*, 2022). Conforme a Teoria dos Valores Extremos, uma GEV conta com três famílias, que devem ser suficientes para representar o comportamento dos máximos anuais: Gumbel, Fréchet ou Weibull reverso (Jenkinson, 1955; Cortez *et al.*, 2022).

São três os parâmetros que compõem a equação distributiva da GEV (Equações 1 e 2, Coles, 2001): localização (μ), escala (σ) e forma (ξ). Além disso, utiliza-se ainda o elemento (x), referente à precipitação máxima anual.

Para $\xi \neq 0$:

$$GEV(x|\mu, \sigma, \xi) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x+\mu}{\sigma}\right)^{\frac{-1}{\xi}}\right]\right\} \quad (1)$$

Para $\xi = 0$:

$$GEV(x|\mu, \sigma, \zeta) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \quad (2)$$

O ajuste da GEV de forma que os parâmetros de localização, escala e forma são constantes no tempo é considerado estacionário e comumente aplicado em casos em que não há aumento na frequência e magnitude de eventos extremos ao longo do tempo.

3.4.1 Modificação da GEV para incluir comportamento não estacionário das chuvas extremas

Os estudos do aspecto não-estacionário em precipitações é uma abordagem que vem sendo empregada com a finalidade de representar a variabilidade do clima ao longo do tempo (e.g. El Adlouni *et al.*, 2007; Tramblay *et al.*, 2012, 2013; Zhou *et al.*, 2012; Westra; Alexander; Zwiers, 2013; Cheng *et al.*, 2014; Almeida; Welle; Birkmann, 2016; Agilan; Umamahesh, 2017; Vu; Mishra, 2019; Xavier *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Cortez *et al.*, 2022). Especificamente, a modelagem de padrões não-estacionários se dá através da inclusão da variação temporal dos parâmetros da equação GEV (Tramblay *et al.*, 2012; Cortez *et al.*, 2022).

Tem-se então que a forma geral da GEV não-estacionária em função do tempo é dada por $GEV_t(\mu_t, \sigma_t, \zeta)$. Nesse sentido, considera-se a variável forma (ζ) como uma constante, ao passo que escala (σ) e localização (μ) variam conforme o tempo (Equações 3 e 4; Coles, 2001). Em linhas gerais, ao trabalhar com a não-estacionariedade, consideram-se parâmetros de escala e localização como variáveis em função linear. Dessa forma, μ_t e σ_t são ditados pelas equações abaixo.

$$\mu_t = \beta_0 + \beta_1 t \quad (3)$$

$$\sigma_t = \beta_2 + \beta_3 t \quad (4)$$

Ressalta-se que a função linear é suficiente para a representação do comportamento da chuva não-estacionária, e que variação quadrática não incorre em melhorias da modelagem não-estacionária (Cortez *et al.*, 2022). Considerando θ como a família de parâmetros da GEV (Equações 5, 6 e 7), tem-se:

$$GEV_0 | \theta = (\mu, \sigma, \zeta) \quad (5)$$

$$GEV_1 | \theta_1 = (\beta_0, \beta_1, \sigma, \zeta) \quad (6)$$

$$GEV_2 | \theta_2 = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \zeta) \quad (7)$$

em que GEV_0 representa a modelagem estacionárias das chuvas extremas; GEV_1 é o modelo não-estacionário de chuvas extremas em que apenas o parâmetro de localização varia no tempo (Equação 2); e GEV_2 é o modelo não-estacionário em que ambos os parâmetros de localização e de escala variam no tempo (Equações 2 e 3).

3.4.2 Estimativa de parâmetros

Dessa forma, a fim de se obter estimativas mais adequadas para as variáveis da GEV, empregou-se o Método da Máxima Verossimilhança (Smith, 1985; Cortez *et al.*, 2022), que por sua vez consiste em um sistema de equações formado a partir das derivadas parciais da função de semelhança provável referentes a cada parâmetro.

Nesse sentido, uma vez que se trata de um conjunto de equações, sua solução é obtida a partir do sistema de otimização Newton Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS), largamente empregado em estudos de linhas similares (Vasiliades; Galiatsatou; Loukas, 2015). O algoritmo está disponível pelo pacote gratuito do *ismev* para R (Gilleland, 2018; Cortez *et al.*, 2022). A dedução geral de variáveis é realizada baseada na média e na variância dos dados de precipitação (Gilleland, 2018).

3.4.3 Análise de estacionariedade e escolha de modelo de precipitação extrema

A existência de tendências de precipitação extremas foi feita utilizando dois testes ($\alpha = 0,05$): Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1956) e Deviance (Coles, 2001). Primeiramente, a abordagem de Mann-Kendall é capaz de identificar a existência de eventuais tendências na série histórica de chuva extrema, salientando assim a relevância de se considerar a não-estacionariedade nos dados históricos disponíveis.

Ainda, por meio do indicador de declividade de Sen pode-se identificar a magnitude da tendência; e por fim, com o teste de Deviance (Equação 8) é possível, uma vez definido o comportamento não-estacionário da série, comparar a validade dos distintos modelos de GEV para explicar o comportamento da série de dados. O teste de Deviance (Equação 8) é baseado no logaritmo da máxima verossimilhança para cada equação da Função Generalizada de Valores Extremos.

Em outras palavras, o teste de deviance nos permite então estabelecer qual modelo seguir: GEV_0 , GEV_1 ou GEV_2 para determinada região e seu padrão de precipitações (El

Adlouni *et al.*, 2007; Trambly *et al.*, 2012; Coles, 2001; Xavier *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Cortez *et al.*, 2022).

$$D = 2 [l_1(GEV_1) - l_0(GEV_0)] \quad (8)$$

Assim, para dados não-estacionários empregamos a Equação 8, comparando a GEV_1 e GEV_2 e distinguindo qual modelo não-estacionário melhor se enquadra ao descrever o comportamento de precipitações extremas. Nesse sentido, para cada píxel da área de estudo, as Equações 8 e 9 definem qual modelo de GEV deve ser empregado para melhor representar precipitações extremas.

Dessa maneira, os dados que mostram uma maior adesão a GEV_0 são estacionários e aqueles que mostram uma maior adesão tanto para GEV_1 quanto GEV_2 são não-estacionários (Equação 9).

$$D = 2[l_2(GEV_2) - l_1(GEV_1)] \quad (9)$$

3.5 Cálculo de lâmina para precipitações extremas em diferentes períodos de retorno

Considerando que projetos de engenharia e infraestrutura para evitar desastres levam em consideração a estimativa de lâminas de chuva extrema associada a diferentes períodos de retorno, neste trabalho fez-se o cálculo da precipitação extrema referentes aos tempos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos utilizando de base valores máximos absolutos de precipitações no período de 1985 a 2022. No caso, Q_r a lâmina de precipitação extrema, [mm/dia], vinculado por sua vez ao período de retorno r , em anos, sendo respectivamente μ , σ e ξ localização, escala e forma.

Conforme ocorre em pixels não-estacionários, na variação do tempo, os valores μ e σ passam por variações (Equações 10 e 11). Devido a isso, cada ano analisado demanda uma GEV própria, alterando a frequência da precipitação, crescente ou decrescente. Isso se reflete nos valores de precipitação para distintos períodos de retorno. Dessa forma, o período de retorno passa por uma mudança também dentro do campo não-estacionário, uma vez que se interpreta ele como a expectativa do número de ocorrências de precipitações em certa magnitude, inseridas em determinado tempo r (esse, em anos). Tempo que pode ser maior ou menor conforme a dinâmica da área em questão.

Assim sendo, espera-se que a intensidade de precipitação ultrapasse determinado patamar dentro de r anos (5, 10, 25, 50, 100, 1000 anos). Essa se mostra como uma abordagem otimizada e eficaz para projetos de engenharia. Isso difere de abordagens mais tradicionais, que ao tratar o período de retorno como um valor de magnitude de precipitação, obtém resultados imprecisos ou mesmo subestima a frequência de ocorrência de chuvas extremas (Collins *et al.*, 2011; Salas; Obeysekera; Vogel, 2018; Yang *et al.*, 2019; Cortez *et al.*, 2022).

Considerou-se, por fim, buscando uma margem de segurança maior, para projetos de infraestrutura e uso geral, níveis de retorno associados aos valores mais elevados estimados, conforme as Equações 10 e 11.

Para $\xi \neq 0$

$$Q_r = \max \left(\mu_t - \frac{\sigma_t}{\xi} \{1 - [-\log(1 - r^{-1})]^{-\xi}\} \right) \quad (10)$$

Para $\xi = 0$

$$Q_r = \max \left(\mu_t - \sigma_t \log [-\log(1 - r^{-1})] \right) \quad (11)$$

3.6 Processamento de geodados

Processar os diversos fatores demandou uma plataforma de integração de todos os dados supracitados.

Destaca-se que sobretudo os dados meteorológicos foram previamente elaborados no RStudio, onde os processamentos descritos no item 3.3.3 foram realizados. Nota-se que parte dos dados, inicialmente vetoriais, tiveram de ser classificados mediante a utilização de scripts no QGIS, uma vez que dispunham de suas informações em conteúdo acadêmico (IBGE, 2019), porém não entre as camadas de GIS.

Nesse sentido, parte dos dados foram agrupados a fim de se obter o valor definitivo para seu respectivo fator (Quadro 5). Destaca-se:

1. Contatos de vegetação com formações vegetacionais, ocupação urbana e áreas agráveis;
2. Textura pedológica com classe pedológica;
3. Falhas geológicas com dobras geológicas;
4. Gênese geológica com províncias e subprovíncias geológicas;

Quadro 5 – Padrão de processamento de dados das diferentes camadas empregadas ao longo do trabalho

Número	Tipo de dados	Processamento necessário
1	Declividade	Calculadora raster com classificação das declividades conforme IBGE, 2019. Após isso, subsequente classificação dos diferentes fatores dentro dos respectivos valores, na função calculadora raster, do QGIS.
2	Contatos de vegetação	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
3	Formações vegetacionais	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
4	Textura pedológica	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
5	Classe pedológica	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
6	Distância dos corpos d'água	Formação de zona buffer a partir de dados vetoriais no QGIS, com classificação de valores e rasterização.
7	Densidade de drenagem	Destacamento de cada curso d'água, baseado nos geodados da Agência Nacional de Águas, com sua referente bacia hidrográfica, essa obtida por meio dos dados SRTM. Os valores foram obtidos mediante a obtenção da razão entre o comprimento dos cursos d'água dividido pela área referente à sua bacia. Após o procedimento foi realizada sua avaliação, de zero a dez, e por fim, a rasterização do resultado.
8	Faces de exposição	Calculadora raster com avaliação dos valores. Processo realizado via QGIS.
9	Falhas geológicas	Formação de zona buffer a partir de dados vetoriais no QGIS, com classificação de valores e rasterização.
10	Dobras geológicas	Formação de zona buffer a partir de dados vetoriais no QGIS, com classificação de valores e rasterização.
11	Gênese	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
12	Províncias geológicas	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
13	Subprovíncias	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
14	Ocupação urbana	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
15	Áreas agráveis	Utilização de Script em QGIS e subsequente rasterização.
16	Distância das vias de transporte	Formação de zona buffer a partir de dados vetoriais no QGIS, com classificação de valores e rasterização.
17	Média das máximas entre 1985-2022 entre 1 e 4 dias	Desenvolvimento no programa RStudio à obtenção dos dados brutos, com subsequente trabalho no QGIS, inclusa reclassificação de 0 a 10.
18	Tempos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos	Desenvolvimento no programa RStudio à obtenção dos dados brutos, com subsequente trabalho no QGIS, inclusa reclassificação de 0 a 10.
19	Locais de quebra da tendência "tau"	Desenvolvimento no programa RStudio à obtenção dos dados brutos, com subsequente trabalho no QGIS, inclusa reclassificação de 0 a 10.
20	Direção de tendência para o sudeste brasileiro	Desenvolvimento no programa RStudio.
21	Favelas e comunidades urbanas	Utilização apenas gráfica para evidenciar a existência em nível local.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O processo de agrupamento, realizado pela tabela de atributos do QGIS, forneceu então valores prévios, conforme os critérios que representavam. Segue-se então um processo de reamostragem, a fim de se obter uma malha de 30m x 30m (baseada nos arquivos de relevo) capaz de contemplar a resolução desejada para a avaliação do estudo.

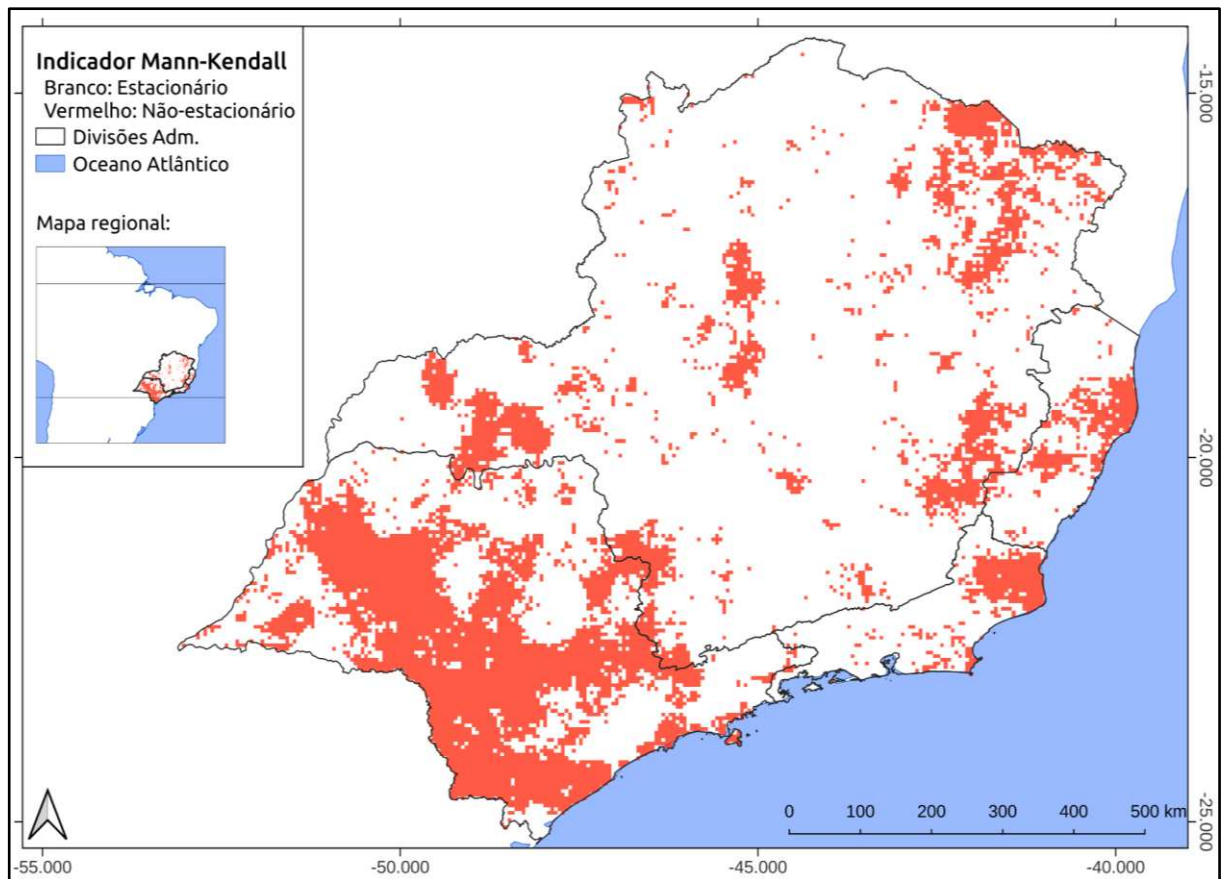
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitações extremas

4.1.1 Análise de tendências de precipitações extremas

A análise do teste de Mann-Kendall permitiu identificar regiões onde houve tendência nas lâminas de precipitação máxima, indicando, portanto, o comportamento não-estacionário nessas áreas (Figura 5), ao passo que nas demais, predomina o estacionário.

Figura 5 – Representação espacial das áreas com ocorrência de comportamento não-estacionário (em vermelho) e as demais regiões, estacionárias, em branco

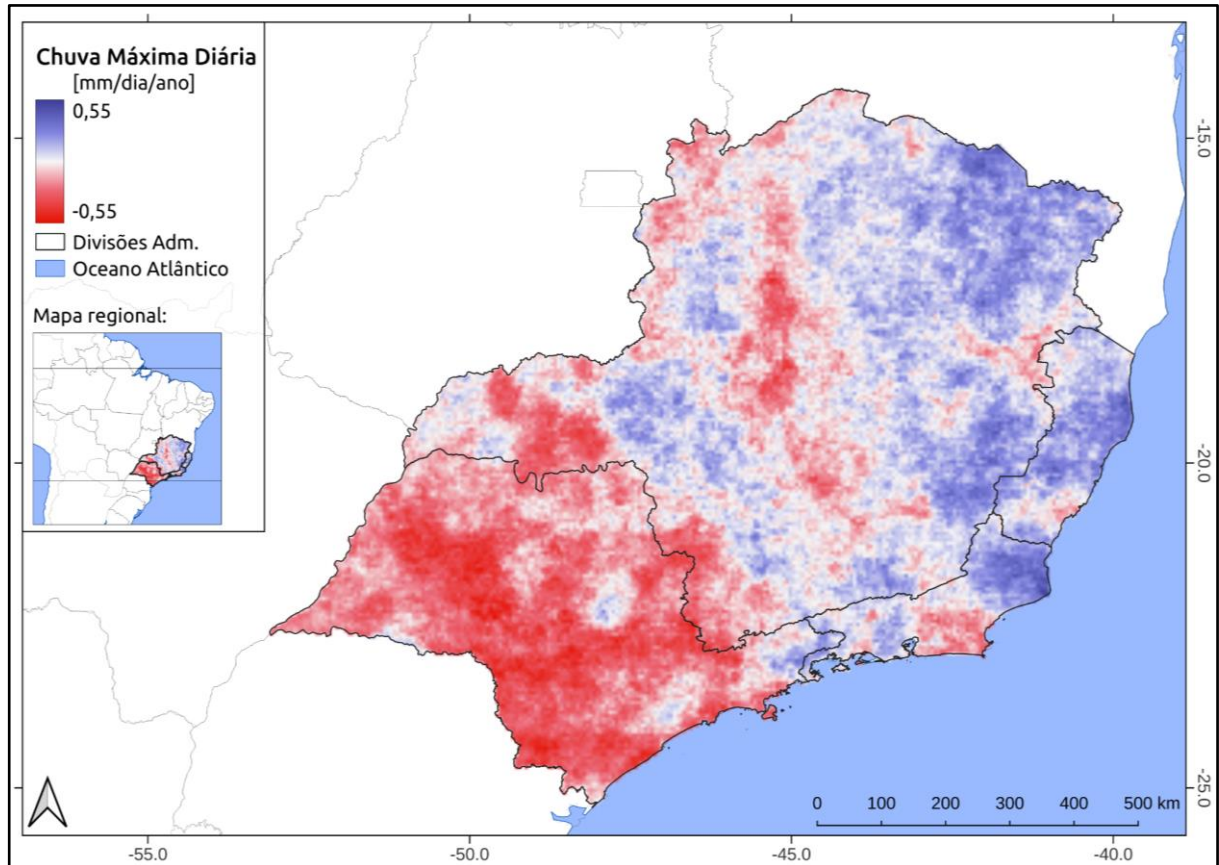


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Nota-se que o comportamento não-estacionário pode ser dividido em duas zonas principais: uma a oeste, cobrindo a maior parte do estado de São Paulo e Triângulo Mineiro e outra, a leste, em manchas, cobrindo o Norte Fluminense, além de partes do Espírito Santo e leste de Minas Gerais.

Foi analisada ainda a tendência de mudança nas chuvas máximas diárias. Pode-se observar um aumento das lâminas máximas diárias referentes à porção oriental do sudeste brasileiro em uma faixa que abarca do Norte Mineiro ao Norte Fluminense (Figura 6).

Figura 6 – Análise de tendência de mudança com as áreas a apresentar dinâmica negativa (em vermelho) e as áreas com dinâmica positiva, com Tau em azul

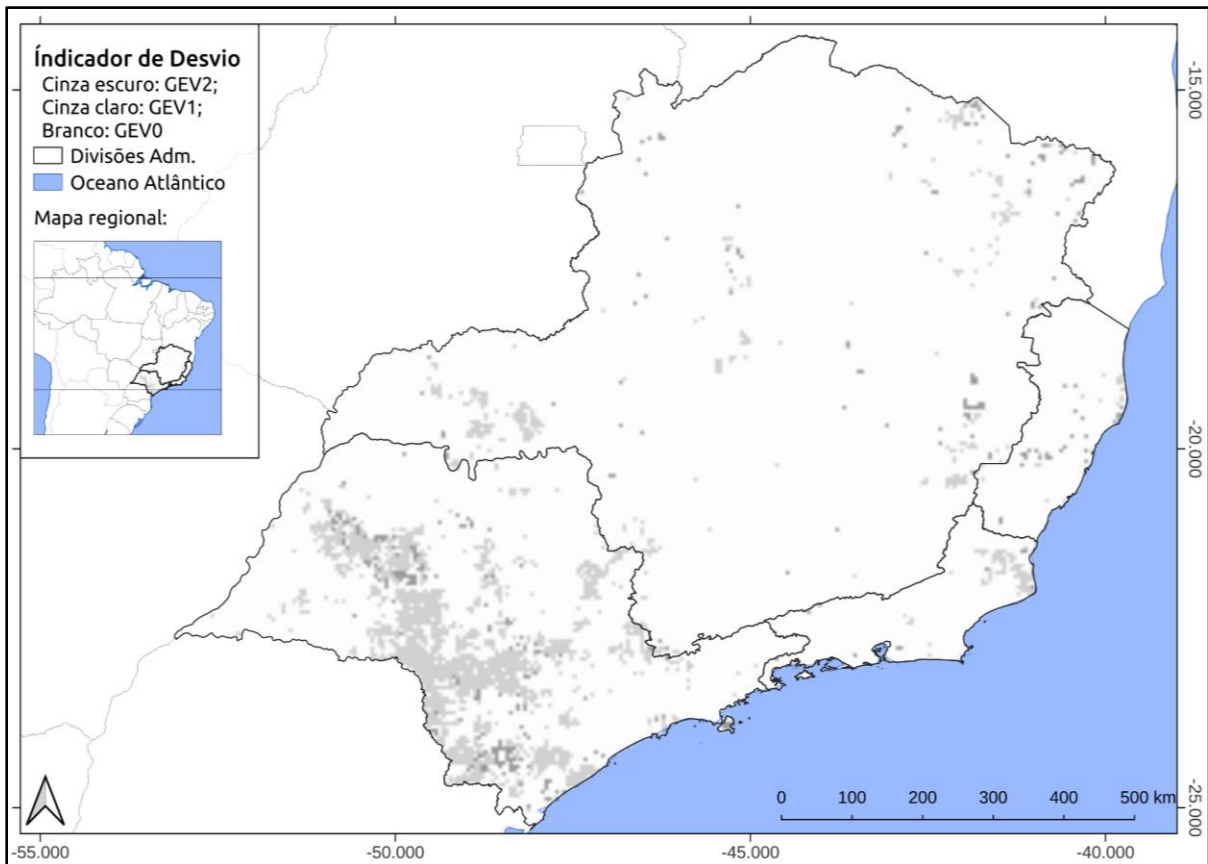


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

4.1.2 Modelos de chuvas extremas

A interpretação dos resultados do Teste Deviance indica qual modelo melhor expressa o comportamento das chuvas extremas em cada pixel da área de estudo. Isso porque a partir do ponto que se tem um desvio do comportamento estacionário, expresso por uma equação GEV0, tem-se então o comportamento não-estacionário, expresso por outras equações, parte das quais representadas pela GEV 1 e 2 (Figura 7).

Figura 7 – Indicador de desvio no sudeste brasileiro, com áreas a indicar zonas correspondentes à GEV 0, 1 e 2



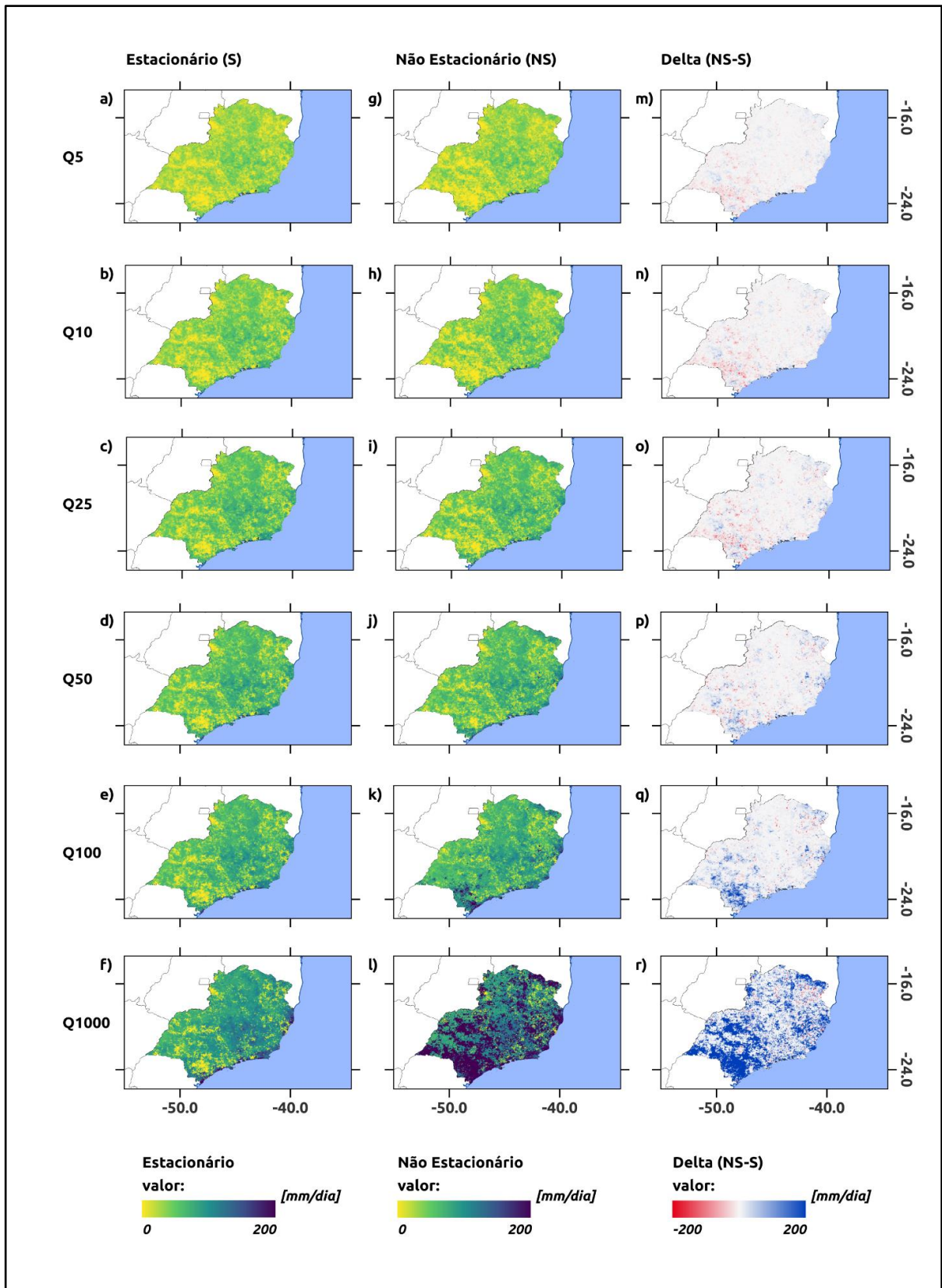
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A maior parte do sudeste brasileiro aderiu ao modelo GEV0, estacionário. A GEV1 é expressa em cinza claro, cobrindo uma maior área em comparação com a GEV2, essa em cinza escuro, e a soma dessas áreas coincide com as áreas em que há tendência nas chuvas extremas indicadas pelo teste de Mann-Kendall.

4.1.3 Estudo dos tempos de retorno das chuvas extremas

As medidas de lâmina de precipitação referente a cada tempo de retorno dos regimes estacionários e não-estacionários. Nota-se que na dinâmica estacionária os valores mudam sobretudo no estado de Minas Gerais e notavelmente em São Paulo, sendo particularmente mais expressivos nas regiões costeiras nos períodos de 100 e sobretudo de 1000 anos (Figura 8a a 8f).

Figura 8 – Representações espaciais dos valores de lâmina precipitada nos regimes estacionários e não-estacionários e a diferença entre os valores dos dois regimes



Por outro lado, na dinâmica não estacionária, as lâminas que seriam esperadas para precipitações de 100 anos (no padrão estacionário) passam a ser observadas com tempo de recorrência de 50 anos (Figuras 8f e 8k). Cabe notar, ao passo que as lâminas d'água a partir de 100 anos apresentam localmente valores muito superior ao previsto para 1000 anos no padrão estacionário (Figuras 8k e 8f), Q1000 não-estacionário apresenta lâminas d'água muito expressivas em praticamente todo o sudeste brasileiro (Figuras 8l a 8r).

Nesse sentido, a diferença entre os dois regimes também fornece valores crescentes, com exceção dos períodos Q5 a Q25 (Figura 8m e 8o), que apresentam localmente valores moderadamente negativos. A partir de Q100 (Figura 8q), sobretudo no sul de São Paulo e litoral norte paulista, as lâminas d'água se mostram muito mais intensas. Essa anomalia positiva, em Q1000 (Figura 8r), cobre boa parte do estado de São Paulo, além das áreas com comportamento não-estacionário nas porções do leste de Minas Gerais, além de Rio de Janeiro e Espírito Santo.

4.2 Resultados do processo de análise hierárquica (AHP)

A seguir são apresentadas as parcelas de participação de diferentes fatores na estruturação da AHP. Essas parcelas indicam o quão influentes foram os diferentes fatores na organização do método e são um produto de uma série de ponderações acerca dos diferentes cenários estudados.

A etapa das elaborações das AHPs se deu de maneira iterativa, sendo necessária a realização de uma determinada quantidade de correções de parâmetros para a obtenção de um resultado. Em um dos cenários, foi necessário realizar mais de 10 correções.

Durante o desenvolvimento, foi estudada a possibilidade de se travar os indicadores de parte dos fatores, como nos cenários não-estacionários, algo que se mostrou incorreto e, portanto, abolido. Ocorre que o travamento de um ou mais fatores, a exemplo dos pedológicos, em detrimento de outros, como o Deviance, incorreria da subestimação da susceptibilidade final para diversas regiões e possibilidade de superestimação de outros. Trabalhar com fatores livres se provou não apenas uma alternativa viável, mas mais simples do que com travamento. A razão de consistência geral consta ao final de cada cenário estudado.

4.2.1 Processo de análise hierárquica considerando o comportamento estacionário das chuvas extremas

Primeiramente foi organizada a análise referente aos deslizamentos associados ao padrão estacionário. Nesse sentido, se destaca a predominância dos fatores declividade (20), precipitação máxima diária (13,8%), pedologia (11,9%), quebra de tendência (11,6%) e uso do solo (10,3%). Fatores geológicos somados integram 19,5%, mas, se analisados à parte, representam em média 4,8% (Tabela 14).

Tabela 14 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de deslizamentos em cenário estacionário

Fator	Percentual (%)
Gênese geológica	6,8
Subprovíncia geológica	4,7
Província geológica	7,8
Estruturas geológicas	6,2
Uso do solo	9,1
Precipitações máximas de 1-4 dias	18,7
Densidade de drenagem	2,7
Estradas	4,7
Declividade	23,4
Pedologia	10,1
Distâncias dos corpos d'água	2,9
Face de exposição	2,9
Razão de consistência geral	8,3

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Além disso, para a susceptibilidade a inundações, destaca-se a distância aos corpos d'água (19,6%), declividade (18,0%), seguido de uso do solo (13,2%), precipitações máximas (12,5%) e pedologia (9,3%). Neste cenário, os fatores geológicos somados integram 16,1%, com 4,0% em média, sendo menos expressivos do que em deslizamentos, uma vez que as variáveis sob influência meteorológica desempenham um papel mais substancial (Tabela 15). Nota-se, portanto, que a proximidade ao corpo d'água, a declividade e o uso do solo, juntamente com as precipitações máximas desempenham papel definitivo na ocorrência de inundações.

Tabela 15 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de inundações em cenário estacionário

Fator	Percentual (%)
Gênese geológica	5,0
Subprovíncia geológica	4,4
Província geológica	2,1
Estruturas geológicas	4,6
Uso do solo	13,2
Precipitações máximas de 1-4 dias	12,5
Densidade de drenagem	6,3
Estradas	7,0
Declividade	18,0
Pedologia	9,3
Distâncias dos corpos d'água	19,6
Razão de consistência geral	9,3

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

4.2.2 Processo de análise hierárquica considerando o comportamento não-estacionário das chuvas extremas

Primeiramente foi organizada a análise referente aos deslizamentos, em que se destacam os fatores: declividade (20%), precipitação máxima diária (13,8%), pedologia (11,9%) e magnitude de tendência (11,6%) e uso do solo (10,3%). Fatores geológicos somados integram 19,5%, mas, se analisados à parte, representam em média 4,9% (Tabela 16).

Além disso, no cenário de inundações, destacam-se: distância dos corpos d'água (21,5%) e declividade (17,6%), seguidos de uso do solo (11,8%) e pedologia (10,3%). Neste cenário, os fatores geológicos somados integram 22,5%, com 5,6% em média, sendo menos expressivos do que em deslizamentos, uma vez que as variáveis sob influência meteorológica desempenham um papel mais substancial (Tabela 17).

Tabela 16 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de deslizamentos em cenário não-estacionário

Fator	Percentual (%)
Gênese geológica	7,6
Subprovíncia geológica	2,3
Província geológica	4,3
Estruturas geológicas	5,3
Uso do solo	10,3
Precipitações máximas de 1-4 dias	13,8
Densidade de drenagem	2,7
Estradas	4,2
Declividade	20
Pedologia	11,9
Intensidade de tendência (Deviance)	11,6
Distâncias dos corpos d'água	4,0
Face de exposição	2,2
Razão de consistência geral	7,3

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Tabela 17 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de inundações em cenário não-estacionário

Fator	Percentual (%)
Gênese geológica	8,9
Subprovíncia geológica	4,4
Província geológica	4,7
Uso do solo	11,1
Precipitações máximas de 1-4 dias	10,1
Densidade de drenagem	3,0
Estradas	3,7
Declividade	16,4
Pedologia	8,6
Intensidade de tendência (Deviance)	10,8
Distâncias dos corpos d'água	18,3
Razão de consistência geral	9,1

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A AHP dos períodos de retorno para deslizamentos envolveu a própria periodização como um fator por si só, representado como Fator GEV (6,8%). Nota-se que não dispõe do maior peso, sendo inferior à declividade (18,2%), uso do solo (14,9%), pedologia (13,9%) ou gênese (9,4%). Nesse cenário, fatores geológicos somados obtiveram peso de 29,3%, com peso médio de 7,3% (Tabela 18).

Tabela 18 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de deslizamentos para a aplicação aos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos

Fator	Percentual (%)
Gênese geológica	9,4
Subprovíncia geológica	6,3
Província geológica	4,8
Estruturas geológicas	8,8
Uso do solo	14,9
Densidade de drenagem	3,4
Estradas	5,9
Declividade	18,2
Pedologia	13,9
Fator GEV(Q)	6,8
Distâncias dos corpos d'água	4,1
Face de exposição	3,5
Razão de consistência geral	8,3

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A AHP dos períodos de retorno para inundações envolveu a própria periodização como um fator por si só, representado como Fator GEV (6,5%). Nota-se que não dispõe do maior peso, sendo inferior à declividade (17,6%), uso do solo (11,8%), pedologia (10,3%) ou distância aos corpos d'água (21,5). Nesse cenário, fatores geológicos somados obtiveram peso de 22,5%, com peso médio de 5,6% (Tabela 19).

Tabela 19 – Distribuição percentual do peso dos fatores presentes na AHP de inundações para a aplicação aos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos

Fator	Percentual (%)
Gênese geológica	7,9
Subprovíncia geológica	6,3
Província geológica	4,5
Estruturas geológicas	3,8
Uso do solo	11,8
Densidade de drenagem	4,3
Estradas	5,5
Declividade	17,6
Pedologia	10,3
Fator GEV(Q)	6,5
Distâncias dos corpos d'água	21,5
Razão de consistência geral	

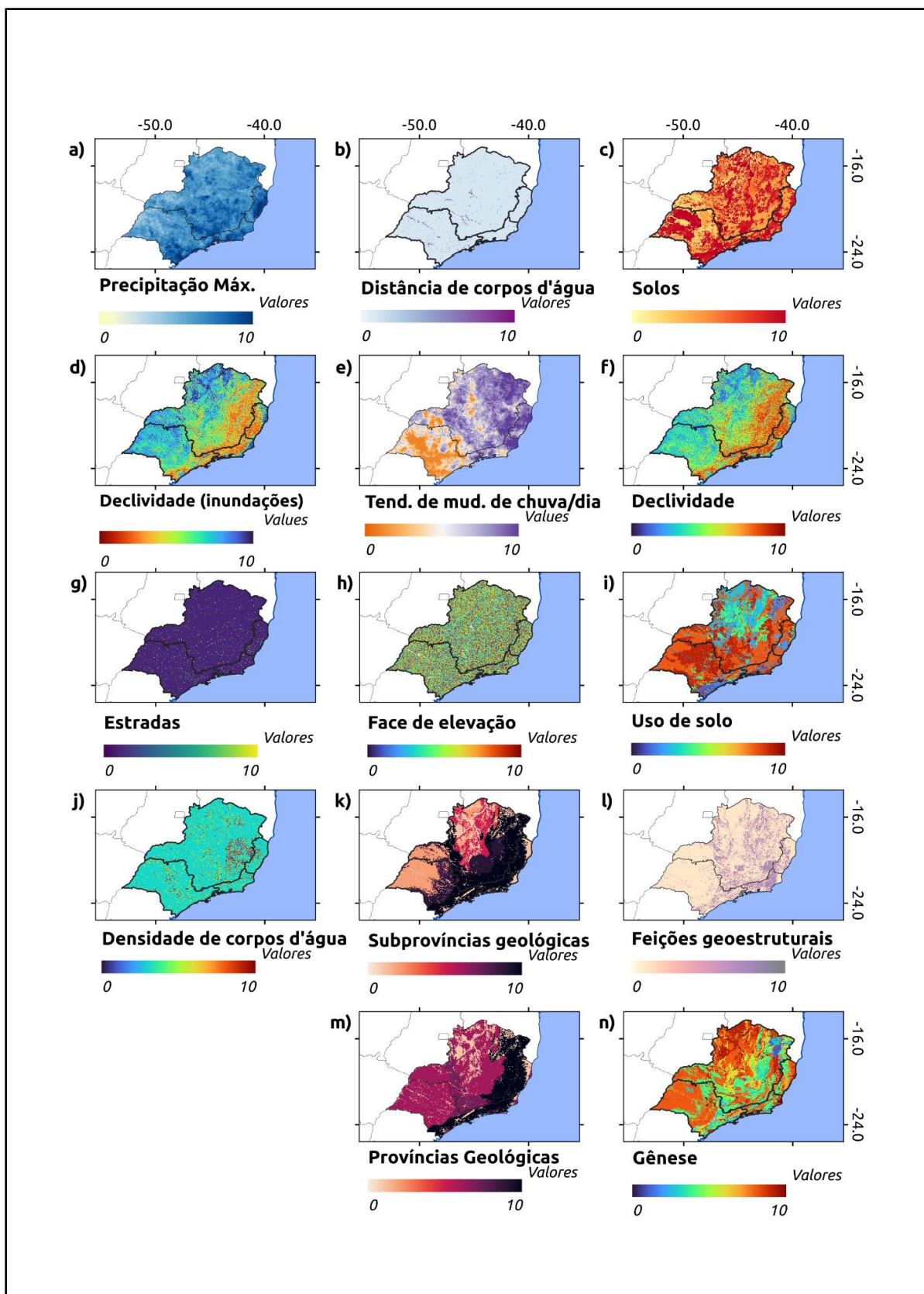
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

4.2.3 Resultados dos fatores para a AHP

Os resultados da estruturação da AHP demonstram um panorama diverso ao longo do sudeste para os fatores considerados. É possível desde já notar a maior susceptibilidade de partes da região do sudeste frente a fatores como províncias e subprovíncias (Figura 9m e 9k, respectivamente), apresentando maiores índices na parte leste a sul da região estudada; declividade (Figuras 9d e 9f, respectivamente), com valores mais acentuados na mesma região; precipitação máxima (Figura 9a), com índices mais proeminentes no Espírito Santo, e partes do Rio de Janeiro e São Paulo; uso de solo (Figura 9i), abarcando desde o Norte Fluminense ao Oeste Paulista.

Cabe ressaltar que o processo de elaboração das AHPs se deu ao longo de dezenas de iterações onde os resultados de cada cenário eram ajustados a critérios de verossimilhança plausíveis aos operadores do processamento. Trata-se de um processo, ainda que versátil e relativamente simples, deveras laborioso e que demanda atenção aos detalhes.

Figura 9 – Representação da avaliação dos fatores empregados na AHP para toda a área de estudo para cada fator estudado



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

4.3 Susceptibilidade a inundações e deslizamentos em condições de estacionariedade e não-estacionariedade das chuvas extremas

Com base nos fatores e na aplicação da AHP, obteve-se valores de risco referentes à susceptibilidade de inundações e deslizamentos para a área de estudos tanto para comportamento estacionário quanto para não-estacionário das chuvas extremas para cada pixel da área de estudos.

Os fatores foram calculados considerando-se a AHP e os pesos descritos no item 4.2 (Tabelas 14, 15, 16 e 17). Foram considerados valores de média a alta susceptibilidade e índices entre 6 e 7 na escala de 1 a 10 da avaliação. Valores a partir de 7 são considerados altos e extremos, acima de 8 (Tabela 20). Essa atribuição se baseia nas zonas indicadas como zonas de risco pelo Serviço Geológico do Brasil (Brasil, 2023b).

Tabela 20 – Gradiente de valores de susceptibilidade

Valor de susceptibilidade	Avaliação
Entre 0 e 6	Baixo risco
Entre 6 e 7	Risco médio a alto
Entre 7 e 8	Risco alto
A partir de 8	Risco extremo

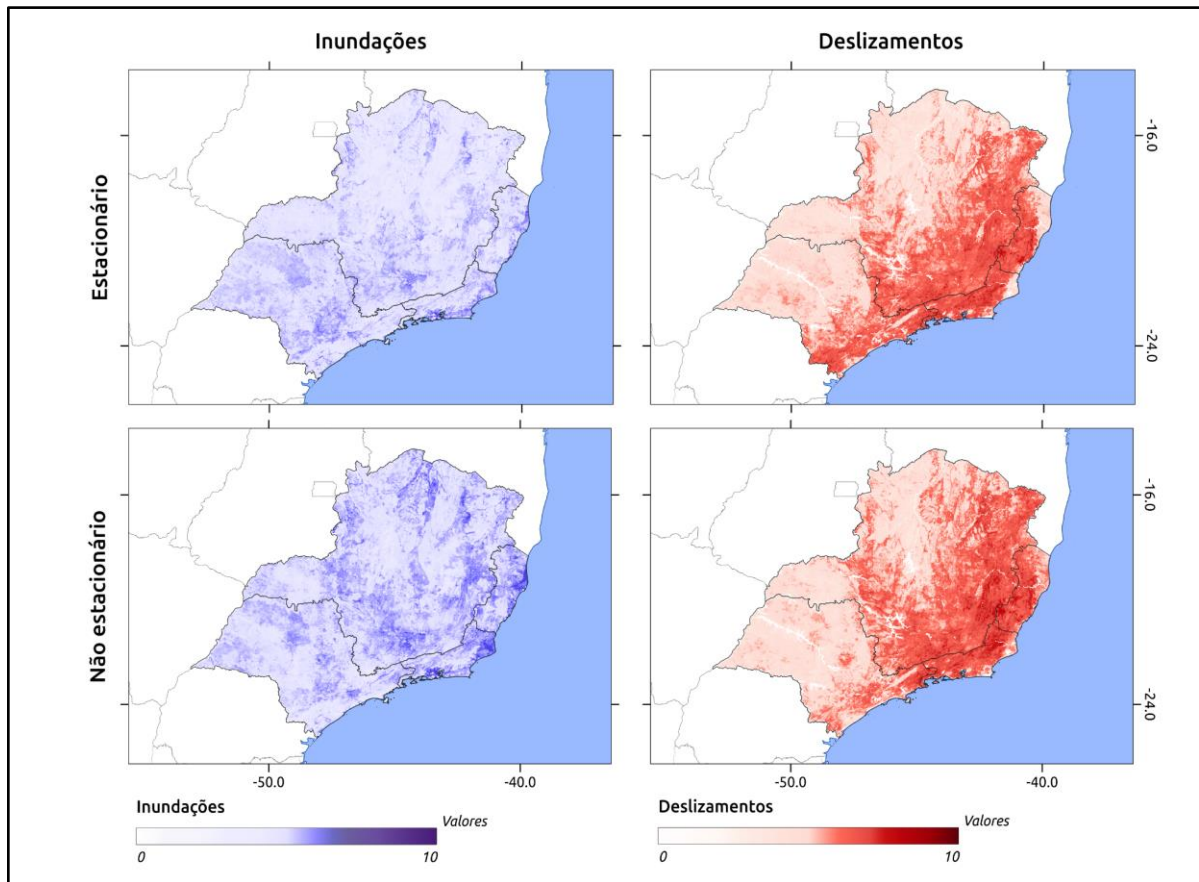
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Nota-se claramente a predominância das áreas de risco suscetíveis a deslizamentos na porção leste, sudeste e sul da área de estudo, assim como uma intensificação nos indicadores para as regiões do Espírito Santo, norte do estado do Rio de Janeiro e leste de Minas Gerais (Figura 10).

No que se refere às inundações, nota-se uma disposição geográfica esparsa ao longo do sudeste brasileiro, com uma relação direta das áreas de maior risco com a planície costeira e os ambientes deltaicos, áreas alagáveis e vales da região.

Observa-se sua presença não exclusivamente em regiões costeiras, mas também no interior, nos vales de regiões do contexto de Mares de Morros e de rios do semiárido mineiro, a exemplo do São Francisco. Isso, tanto nos cenários estacionários quanto, de maneira mais acentuada, não-estacionários.

Figura 10 – Representação para os comportamentos estacionário e não-estacionário tanto para deslizamentos quanto para inundações em toda a área de estudo



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Deslizamentos se destacam nas porções leste e sul da região de estudo: trata-se de uma faixa de altos fatores de susceptibilidade (Subprovíncias, Províncias, Gênese etc.), abarcando cidades grandes e centros locais, com destaque para os estados do Espírito Santo, na parte central e sul, Rio de Janeiro e Minas Gerais, leste, sul e nordeste. Salienta-se a constante vulnerabilidade de comunidades periféricas, muitas vezes instaladas em locais sem a devida infraestrutura de grandes centros e centros locais. Isso se verifica no item 4.5 deste trabalho.

Ao todo, nota-se que no comportamento não-estacionário 31,06% de todo o sudeste brasileiro está suscetível a deslizamentos, frente a 28,82% no comportamento não-estacionário. Isso representa um aumento de 8% entre os dois comportamentos, ao passo que as inundações apresentam um aumento de 2,58% no regime estacionário para 6,47% em não-estacionário, com um aumento de aproximadamente 2,5 vezes (Tabela 21 e Figura 10). Observa-se ainda que ao todo, 31,4% do território do sudeste encontra-se em áreas de susceptibilidade no cenário estacionário, ao passo que no não-estacionário esse valor é 19% maior, totalizando 37,53%. Cabe ressaltar, por outro lado, que partes da área de estudo, sobretudo em São Paulo,

apresentam uma redução do índice de susceptibilidade, notável principalmente no âmbito das inundações.

Tabela 21 – Percentual da área avaliada em risco 6 e superior no sudeste brasileiro para distintos riscos geológicos

Risco	Comportamento	Pontuação superior a 6 pontos (% da área total)
Inundações	Estacionário	2,58
	Não-estacionário	6,47
Deslizamentos	Estacionário	28,82
	Não-estacionário	31,06

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

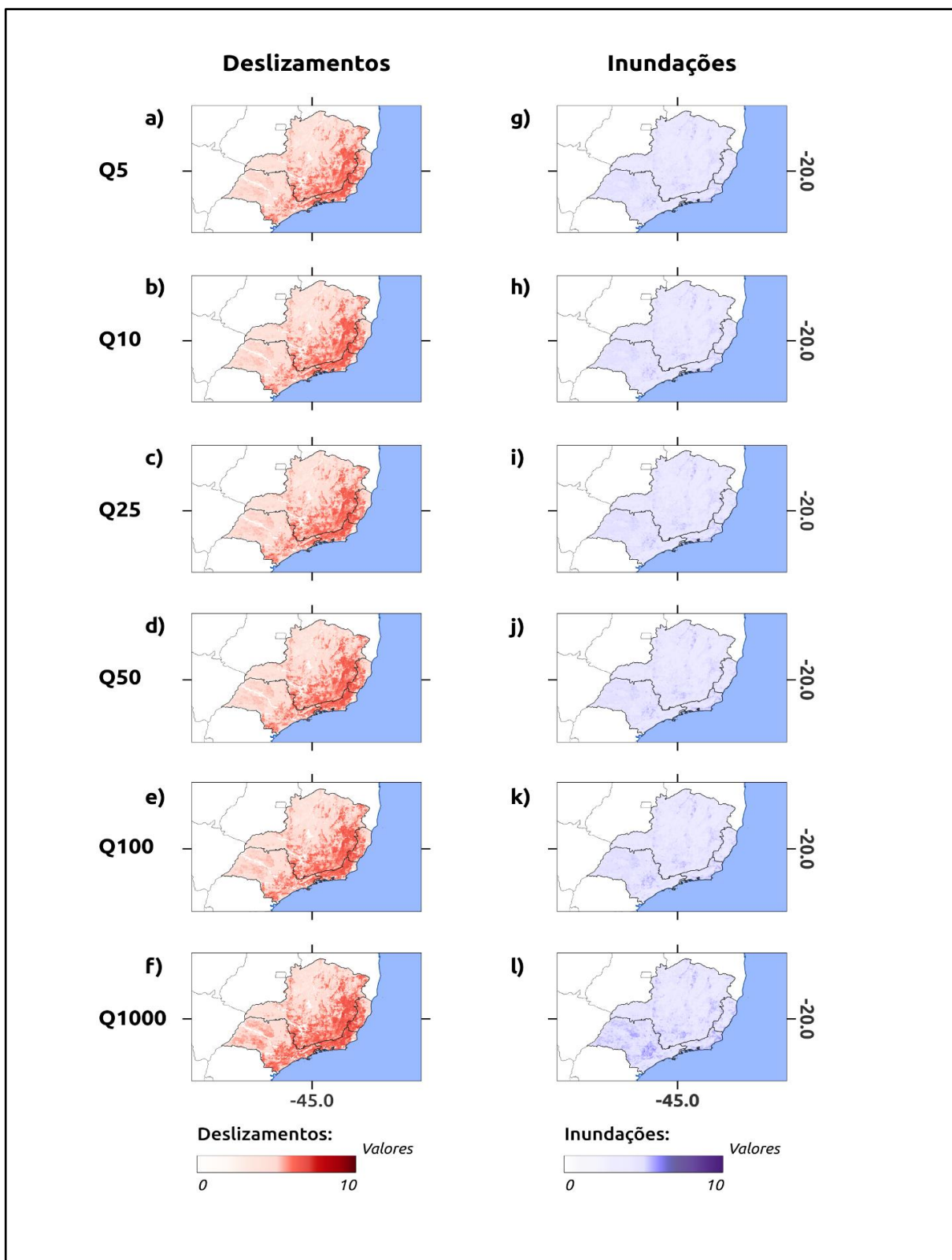
Nota-se que mesmo considerando o comportamento estacionário, nas grandes metrópoles as localidades mais suscetíveis são aquelas onde se nota o predomínio de comunidades periféricas, sobretudo as localizadas no entorno de corpos d'água.

4.4 Avaliação de susceptibilidade a inundações e deslizamentos considerando diferentes períodos de retorno

Nesse ponto, destacam-se as áreas avaliadas por risco geológico no sudeste do Brasil. Notam-se os maiores valores de susceptibilidade na faixa na metade sudeste do sudeste brasileiro em todos os períodos de retorno (Figura 11a a 11f), ao passo que as zonas suscetíveis a inundações se apresentam em áreas de susceptibilidade de escala microrregional entre Q5 e Q100 (Figura 11g e 11l).

Ao observar os resultados obtidos nos fatores estudados no cenário geral e o nível de susceptibilidade ao longo de toda a área de estudo, nota-se que, sobretudo nas regiões geomorfologicamente acidentadas, predominam as principais áreas de risco tanto para deslizamentos quanto para enchentes.

Figura 11 – Avaliação de susceptibilidade referente às lâminas d'água dos períodos de retorno entre 5 e 1000 anos para deslizamentos e inundações



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Nota-se que o presente trabalho operou com basicamente os mesmos fatores que o IBGE em seu *Susceptibilidade a deslizamentos no Brasil* (IBGE, 2019). Por outro lado, ao invés de utilizar os dados de média de precipitação anual, optou-se por considerar chuvas extremas em uma série histórica, aplicando trabalho estatístico para avaliar riscos em diferentes tempos de recorrência. Considerou-se ainda outros fatores, tais como a Densidade de Drenagem por bacia ou a distância de estradas, tal qual Dhungana *et al.* (2023), além de outras variáveis, como a distância aos cursos d'água.

Destaca-se que o trabalho desenvolvido em *Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil* (IBGE, 2019) foi voltado para a identificação de áreas de risco a deslizamentos, ao passo que o presente trabalho lança uma abordagem também para inundações e em espectro mais amplo.

Se por um lado talvez não se abarque eventos como trombas d'água, de ocorrência geograficamente restrita, com caráter ainda mais pontual do que a malha de dados é capaz de cobrir, por outro, obteve-se um resultado adaptável para diferentes níveis de escala. Destaca-se sua empregabilidade para diversas finalidades: deslizamentos, liquefações de solo, colapsos, movimentos de massa, além de inundações, enchentes e alagamentos.

Isso foi possível justamente devido à utilização de fatores não empregados pelo IBGE, como a distância de corpos d'água, de rodovias, além do papel decisivo desempenhado pelos dados meteorológicos, que foi muito além dos dados de média de precipitação.

Haja vista o contexto regional, há que preconizar a conservação e desenvolvimento de matas ciliares. Atuando na contenção do assoreamento, no transporte de sedimentos, além da regulação do próprio fluxo de água, assim como na estabilização das margens dos corpos d'água, as matas ciliares desempenham um papel fundamental na resiliência climática em nível local e mesmo mesorregional.

4.5 Estudos regionais

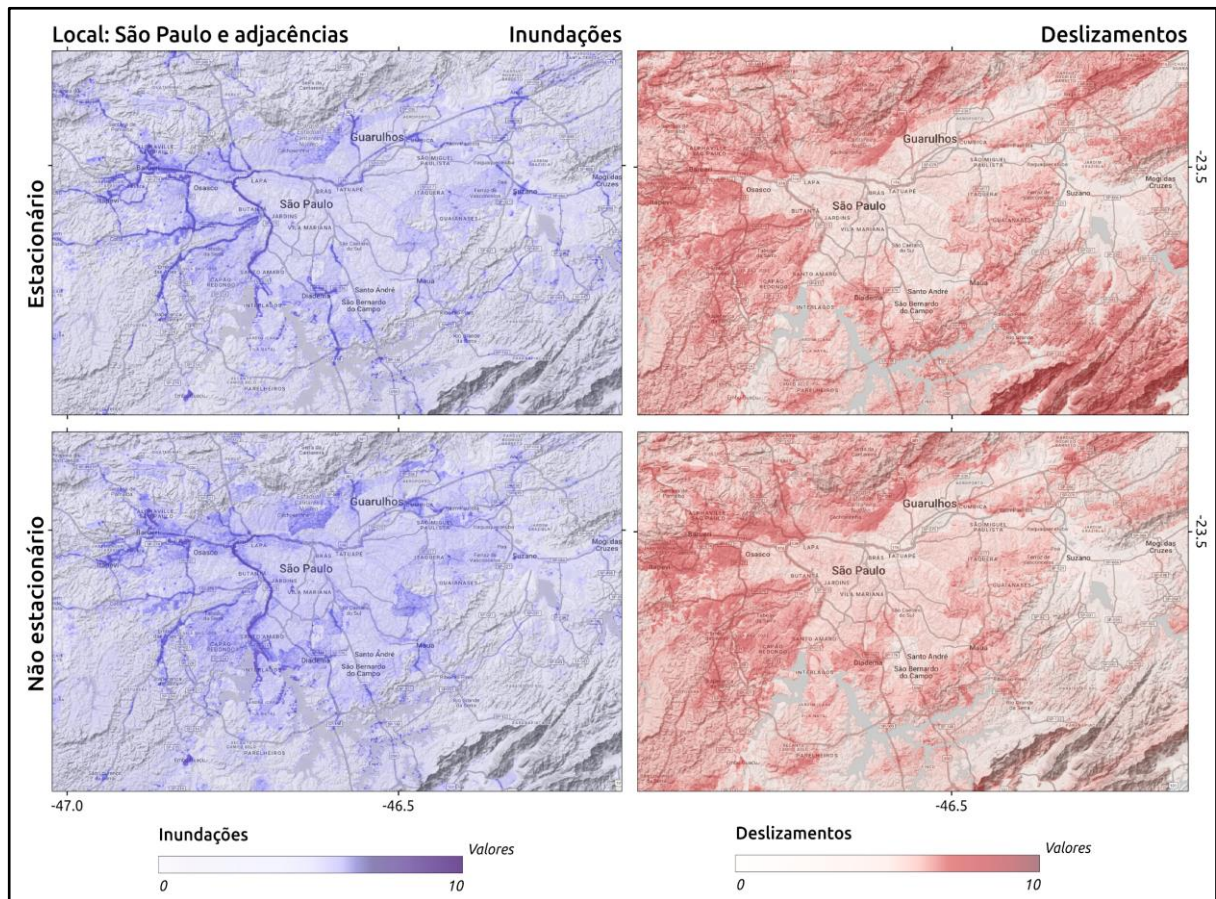
Seguem abaixo análises de caráter regional realizadas com o intuito comparativo em mesoescala para localidades específicas distintas do sudeste brasileiro tanto no padrão estacionário quanto no não-estacionário.

Ressalta-se que os mapas abaixo expressam um cenário moderadamente conservador, dado que foi empregado na AHP de sua confecção, valores relativos à padronização do indicador de Mann Kendall, sem, portanto, empregar os valores de período de retorno mais extremos como de 100 ou 1000 anos.

4.5.1 São Paulo e adjacências

Em um aspecto geral, notam-se índices de susceptibilidade mais altos nos arredores de São Paulo (cidades satélites, áreas com comunidades periféricas) do que na parte central da área metropolitana (Figura 12). Destaca-se como exceção a parte sudeste do mapa, onde os valores, de maneira geral, tendem a apresentar uma moderada redução, devido à proximidade com áreas de comportamento não-estacionário, que na região exibem uma dinâmica negativa (Figura 13a).

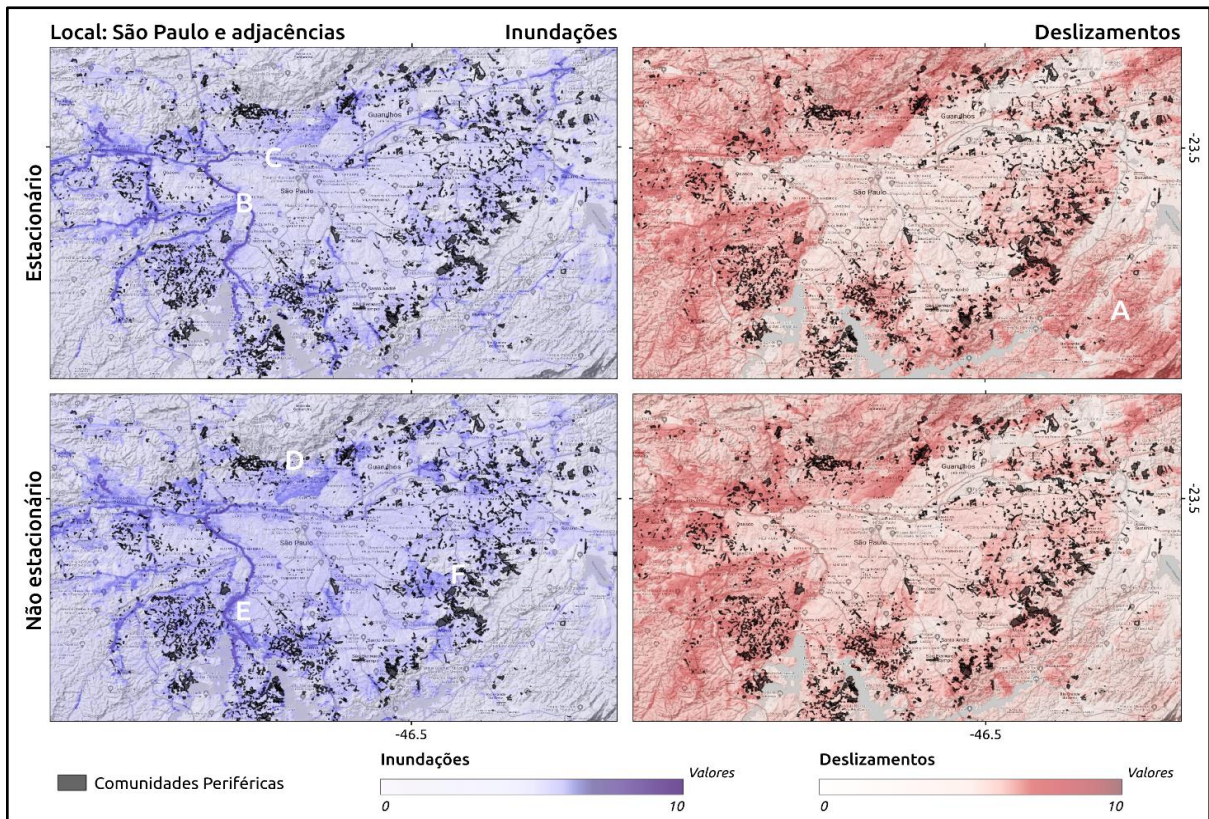
Figura 12 – Índices de susceptibilidade para a região de São Paulo, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Destacam-se as seguintes localidades como pontos de atenção: Vale da Marginal Pinheiros (Figura 13b), Vale da Marginal Tietê (Figura 13c), eixo Guarulhos-Parque Estadual da Cantareira (Figura 13d), Eixo Capão Redondo-Santo Amaro-Diadema (Figura 13e) e Eixo Mauá-Zona Leste (Figura 13f). Áreas como Suzano, Ribeirão Pires, Mogi das Cruzes e outras mais a sudeste apresentam redução dos valores em cenários não-estacionários (Figura 13a).

Figura 13 – Índices de susceptibilidade para a região de São Paulo, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário (incluídas as comunidades periféricas)



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

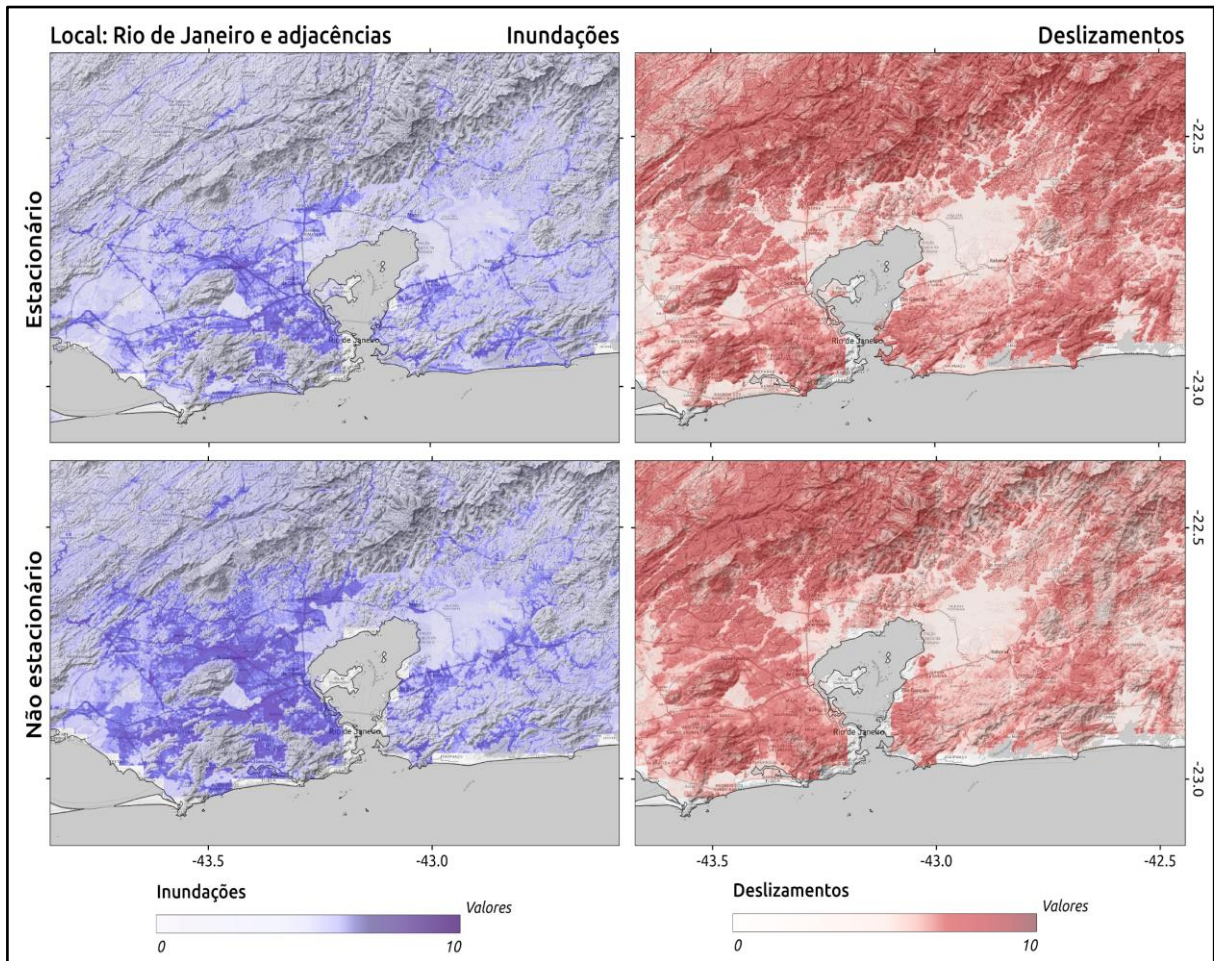
Ressalta-se que valores referentes a inundações, sobretudo os disponíveis para as áreas baixas de comunidades periféricas, estejam ligeiramente subestimados, uma vez que não considera aspectos urbanos como, por exemplo, o sistema de canalização empregado para a drenagem das ruas. Este é um problema deveras conhecido e pertinente não somente a metrópoles brasileiras, mas também as cidades médias e por vezes mesmo pequenas, sendo responsável por muitos alagamentos, sobretudo em grandes centros urbanos.

4.5.2 Rio de Janeiro e adjacências

Estando situado em uma zona costeira bastante acidentada e dispendo de um histórico processo de ocupação de solo parcamente organizado, a zona metropolitana do Rio de Janeiro apresenta uma intensa diferença tanto em área quanto em valores das áreas de susceptibilidade a inundações e deslizamentos (Figura 14). Dessa forma, é notável que as cidades da Baixada Fluminense apresentam vastas áreas suscetíveis a alagamentos e deslizamentos. No caso da

capital fluminense, nota-se que em percentual as áreas mais vulneráveis estão localizadas na Zona Norte e na Zona Oeste.

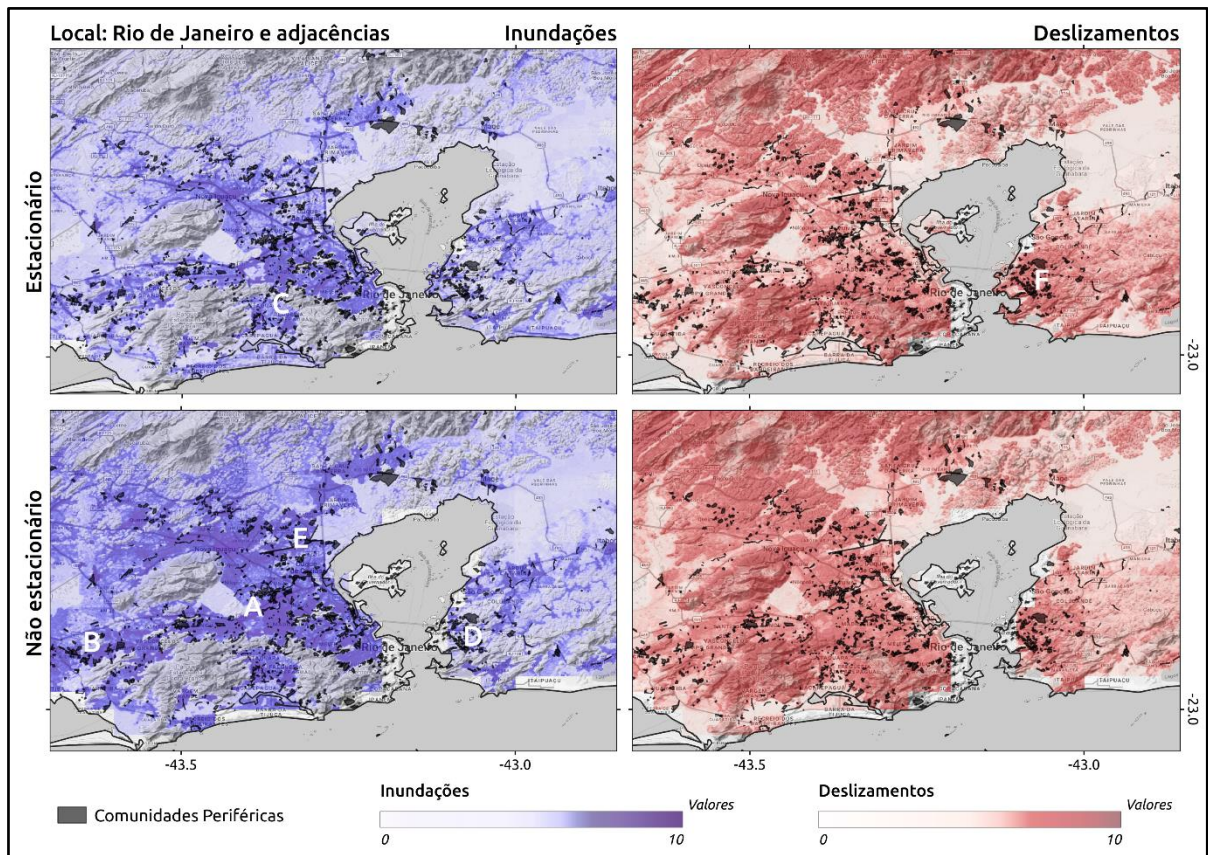
Figura 14 – Índices de susceptibilidade para a região da Baixada Fluminense, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Pode-se destacar as seguintes zonas principais de susceptibilidade: Eixo Tijuca-Nova Iguaçu (Figura 15a), Eixo Madureira-Santa Cruz (Figura 15b), Entorno Taquara-Jacarepaguá (Figura 15c), Eixo Niterói-São Gonçalo (Figura 15d), Duque de Caxias (Figura 15e) e Entorno São Lourenço-Santa Rosa-Largo da Batalha (Figura 15f). Obviamente, a existência de áreas tão extensas de alta susceptibilidade não significa que estes locais serão inundados na menor precipitação, mas que perante cenários relativamente simples de vulnerabilização ou sucateamento infraestrutural.

Figura 15 – Índices de susceptibilidade para a região da Baixada Fluminense, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário (incluídas as comunidades periféricas)



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

4.5.3 Região Serrana Fluminense

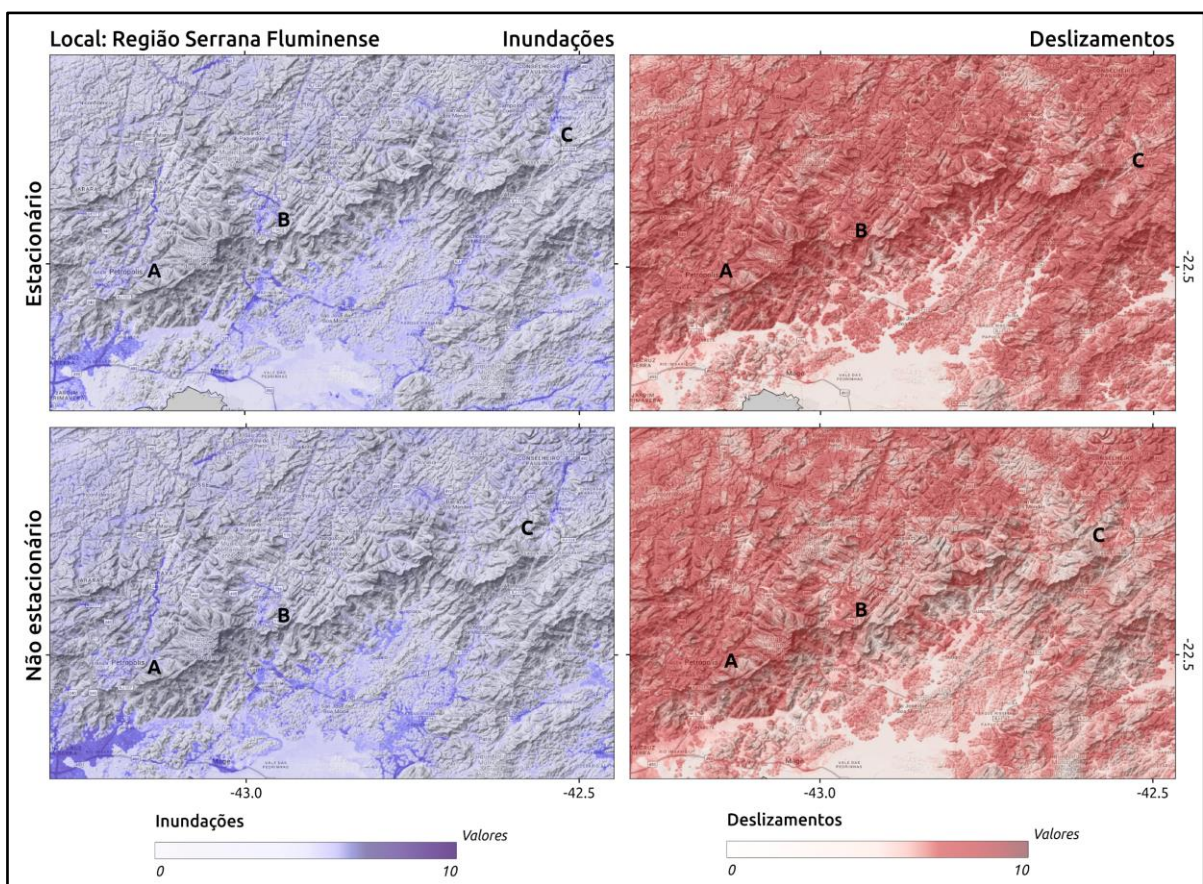
Marcada por um relevo bastante acidentado com montanhas, picos e escarpas, por uma geologia intensamente falhada e fraturada, com um solo não raramente de baixa profundidade e rápida saturação, a região serrana do estado dispõe um vasto histórico de ocorrências de deslizamentos e inundações. Sendo uma região densamente povoada, demanda uma atenção à parte.

Na região destacam-se os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo. Locais construídos ao longo de falhas geológicas e que, com os demais da região, totalizam quase um milhão de habitantes. Trata-se de uma área suscetível em quase a totalidade do perímetro urbano das localidades mencionadas, que também dispõem de comunidades periféricas, com precarização da infraestrutura urbana. A situação é especialmente preocupante

em Petrópolis, município com 24,4% da população total como habitantes de zonas de risco, segundo o levantamento *População em áreas de risco no Brasil*, do IBGE (2018).

Cabe destacar que as áreas de maior vulnerabilidade social se concentram em locais suscetíveis a deslizamentos, ao passo que áreas mais abastadas predominam nos fundos de vales locais sendo, por sua vez, suscetíveis a inundações. Isso, por uma série de motivos, se aplica sobretudo a Teresópolis e Petrópolis (Figura 16b e 16a, respectivamente), uma vez que essas cidades dispõem de uma quantidade muito maior de pessoas em situação de pobreza do que em Nova Friburgo (Figura 16c). Dessa forma, o vale que se estende da parte norte de Petrópolis no sentido SW-NE até Itaipava apresenta valores altos em ambos os cenários, assim como o vale que se estende de Nova Friburgo através de Duas Pedras.

Figura 16 – Índices de susceptibilidade para a região Serrana Fluminense, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário



A – Petrópolis; B – Teresópolis; e C – Nova Friburgo.

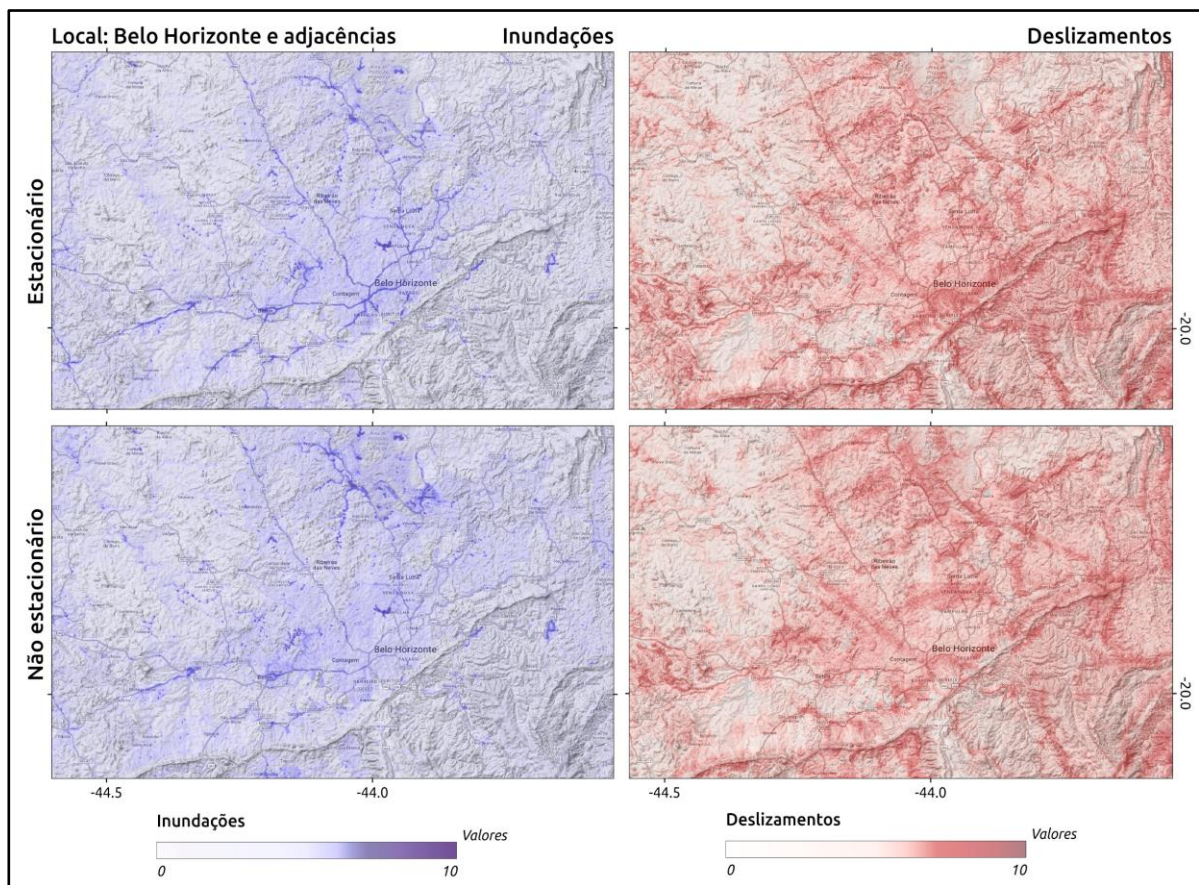
Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Considerando a tendência positiva observada, fortemente, em Petrópolis, é de se esperar que cenários trágicos, que já desabrigaram mais de 20 mil pessoas entre 1991-2022 (Brasil, 2023a), possam tornar-se mais frequentes.

4.5.4 Belo Horizonte e adjacências

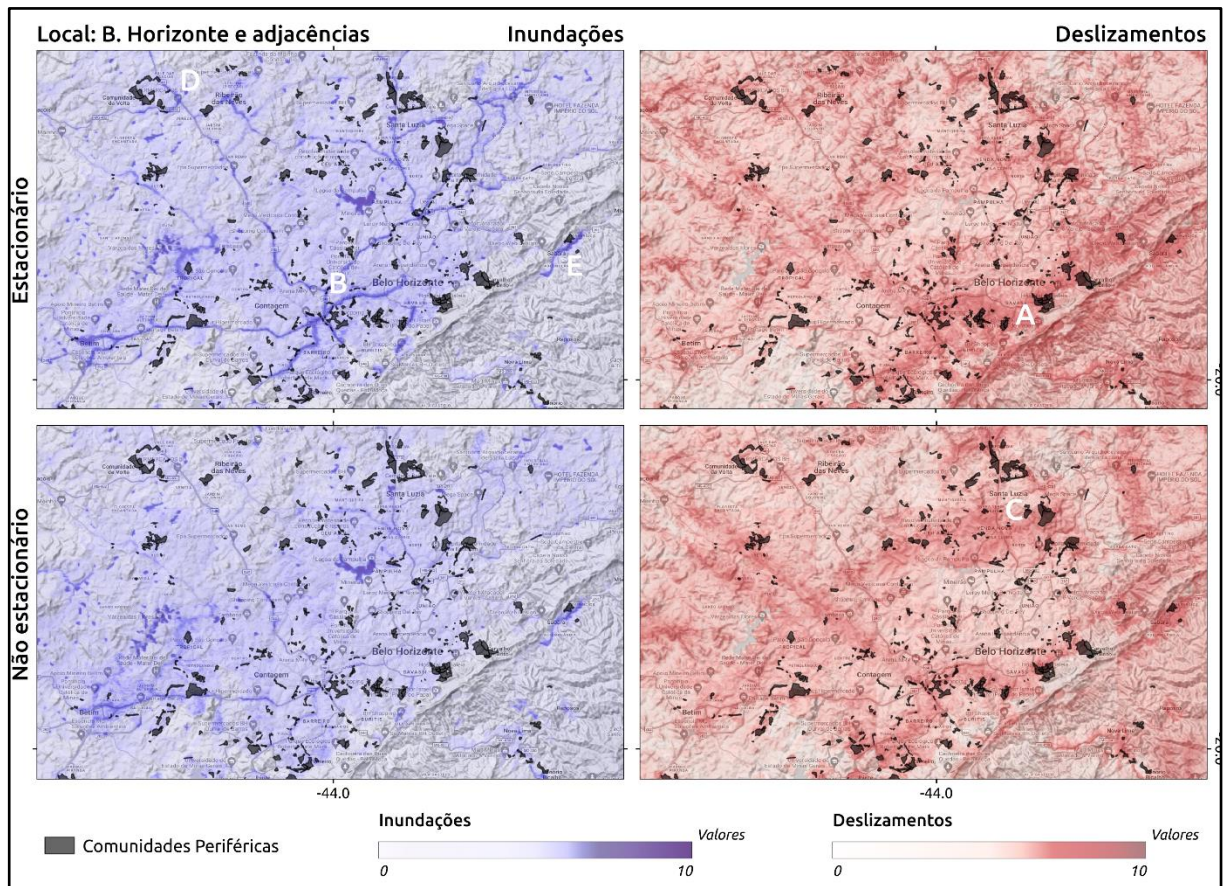
Sendo um dos principais centros urbanos do país, Belo Horizonte apresenta índices que variam relativamente pouco em sua total extensão quando comparada às outras grandes metrópoles do sudeste. Nesse sentido, observa-se que a maior parte das zonas com maior susceptibilidade de deslizamento encontram-se na declividade que abarca o flanco noroeste da Serra do Curral (Figura 17) além da encosta que se estende de Savassi a Contagem (Figura 18b) e, em outro contexto, Venda Nova (Figura 18c). Nota-se que algumas das maiores comunidades periféricas da região encontram-se justamente ao longo do primeiro lineamento citado.

Figura 17 – Índices de susceptibilidade para a região de Belo Horizonte, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Figura 18 – Índices de susceptibilidade para a região de Belo Horizonte, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário (incluídas as comunidades periféricas)



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Ribeirão das Neves (Figura 18d) destaca-se como um local de alta vulnerabilidade tanto social quanto a susceptibilidade a desastres, contando com mais da metade, 60,5% de toda a população local habitante de áreas de risco (IBGE, 2018).

Um caso singular é Sabará (Figura 18e): a cidade, de importância histórica, apresenta alta susceptibilidade tanto no aspecto de deslizamentos quanto de inundações, com diferença pequena entre os cenários estacionário e não-estacionário.

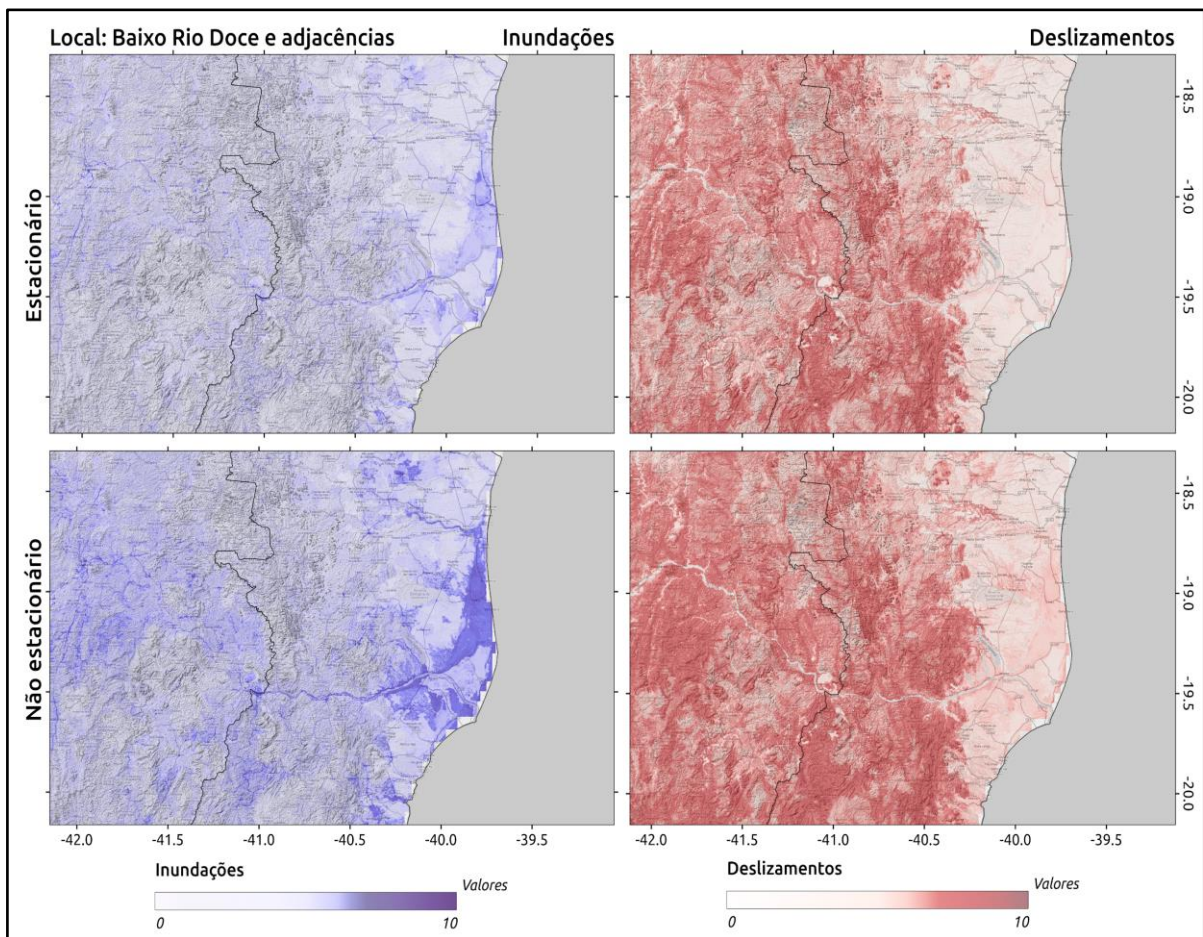
4.5.5 Espírito Santo e Leste de Minas Gerais

O Espírito Santo e Leste de Minas Gerais é outra região que demanda bastante atenção no sentido de que historicamente é um local bastante afetado por desastres.

O estado e suas adjacências apresentam uma dinâmica de aumento da intensidade das precipitações, com a região do baixo Rio Doce apresenta uma alta susceptibilidade a inundações

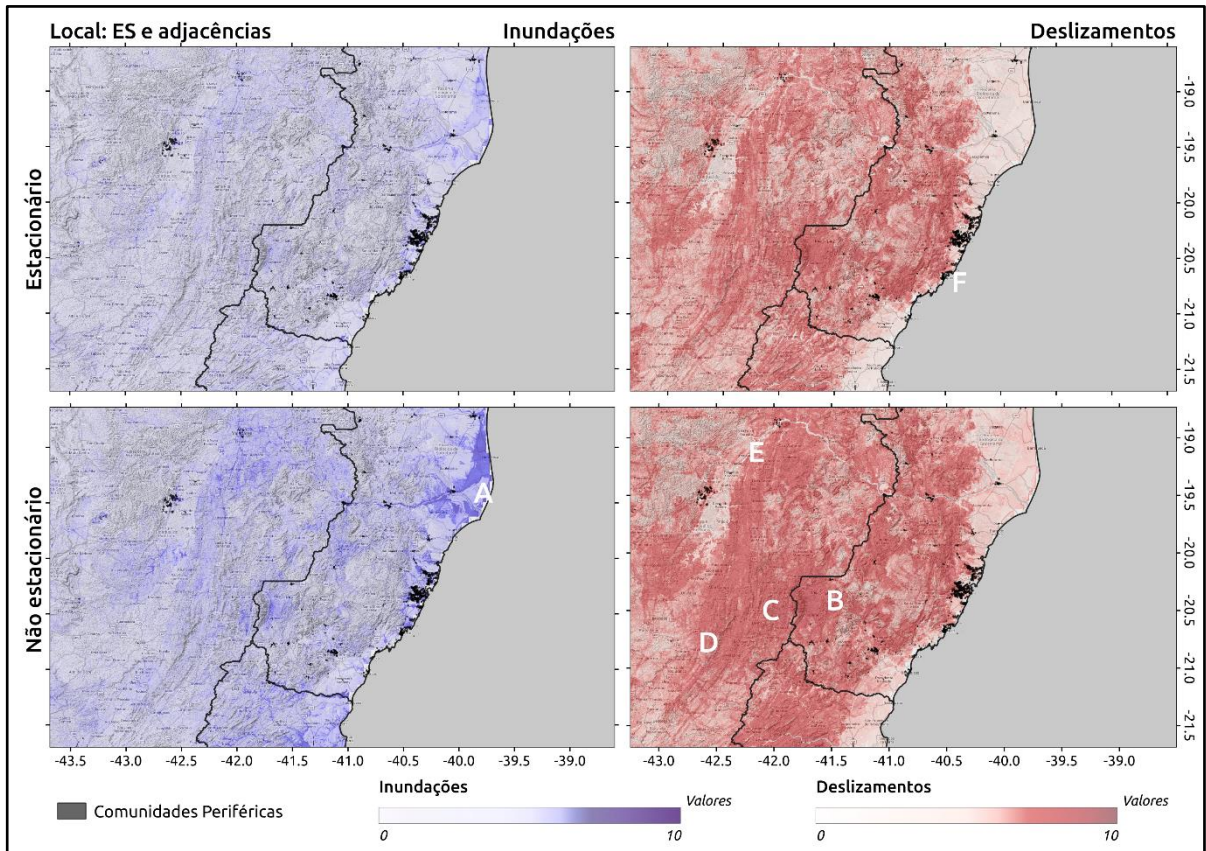
(Figura 19). Por outro lado, o interior capixaba e o leste mineiro (Figura 20b e 20c, respectivamente) apresentam altos valores significativos de susceptibilidade a deslizamentos e, com caráter mais pontual, também de inundações. Nota-se que, a partir da Serra do Brigadeiro (Figura 20d), em Minas Gerais, se estendendo a norte pela borda Leste da depressão do Vale do Rio Doce até a região de Capitão Andrade, MG (Figura 20e), uma vasta zona de altos valores referentes a deslizamentos.

Figura 19 – Índices de susceptibilidade para a região do Espírito Santo e adjacências, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não-estacionário



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Figura 20 – Índices de susceptibilidade para a região do Espírito Santo e adjacências, com deslizamentos e inundações considerando o comportamento estacionário e, abaixo, o não estacionário



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

5 CONCLUSÃO

Este estudo objetivou, por meio da estruturação de um banco de dados referentes a fatores atuantes em deslizamentos e inundações, estabelecer valores de susceptibilidade a desastres, considerando, em uma abordagem multifatorial, o comportamento não-estacionário de precipitações. Além disso, realizou-se o cálculo de lâmina precipitável para diversos períodos de retorno entre 10 e 1.000 anos.

Foi evidenciado a vulnerabilidade do sudeste brasileiro frente a eventos de precipitação acentuada, a ponto de se ter 31,4% da extensão territorial da região sob risco em regime estacionário e 37,53% em regime não-estacionário, com um aumento de 2,5 vezes das áreas sob risco de inundação. Isso inclusive em localidades densamente povoadas, ao considerar fatores até então não abordados de maneira detalhada por abordagens prévias ao nível macrorregional, como foi o caso das precipitações e não-estacionariedade.

Os cenários descritos estão associados ao histórico das últimas décadas ao nível regional em áreas onde a urbanização se fez presente, frequentemente de maneira desordenada e sem a infraestrutura adequada, em decorrência de tendências históricas do Sudeste e outras regiões do Brasil.

IBGE (2019) trabalha diversos fatores, a maioria abarcada neste trabalho, porém em termos de precipitação, opera com valores médios, sem considerar que termos médios subestimam valores de susceptibilidade, melhor trabalhados através da análise de valores máximos. No mesmo sentido, desconsidera objetos de infraestrutura como estradas, bem como a proximidade de corpos d'água, entre outros fatores.

Por outro lado, Dhungana *et al.* (2023) trabalham com um contexto muito diferente, no Himalaia, e com fatores igualmente distintos, porém de interesse para a determinação de áreas de risco, sobretudo em localidades urbanizadas, micro ou mesoescala.

Cabe lembrar que os resultados obtidos se deram através da utilização dos fatores elencados por ambos mais outros, não utilizados. Da mesma forma, não faria sentido trabalhar tanto o valor de média quanto o de máximas das precipitações, uma vez que os resultados certamente subestimariam, ainda que em menor escala, os valores e pesos obtidos ao fim.

REFERÊNCIAS

- AGILAN, V.; UMAMAHESH, N. V. What are the best covariates for developing non-stationary rainfall intensity-duration-frequency relationship? **Advances in Water Resources**, v. 101, p. 11-22, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.016>
- AGUIAR, L. F.; CATALDI, M. Social and environmental vulnerability in Southeast Brazil associated with the South Atlantic Convergence Zone. **Natural Hazards**, v. 109, p. 2423-2437, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04926-z>
- ALEXANDER, L. V.; ARBLASTER, J. M. Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. **Weather and Climate Extremes**, v. 15, p. 34-56, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.02.001>
- ALMEIDA, L. Q.; WELLE, T.; BIRKMANN, J. Disaster risk indicators in Brazil: a proposal based on the world risk index. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 17, p. 251-272, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.007>
- AMARASINGHE, M. P.; KULATHILAKA, S. A. S.; ROBERT, D. J.; ZHOU, A.; JAYATHISSA, H. A. G. Risk assessment and management of rainfall-induced landslides in tropical regions: a review. **Natural Hazards**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06277-3>
- AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 5-6, p. 1403-1426, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- BATHRELLOS, G. D.; GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; SKILODIMOU, H. D.; PAPANASTASSIOU, D.; CHOUSIANITIS, K. G. Potential suitability for urban planning and industry development using natural hazard maps and geological-geomorphological parameters. **Environmental Earth Sciences**, v. 66, p. 537-548, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1263-x>
- BORELLI, L.; GRECO, R.; GULLA, G. Weathering grade of rock masses as a predisposing factor to slope instabilities: reconnaissance and control procedures. **Geomorphology**, V. 87, n. 3, p. 158-175, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.031>
- BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Rural. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. **Atlas digital de desastres no Brasil**. 03 abr. 2023a. Disponível em: <http://atlasdigital.mdr.gov.br/>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Serviço Geológico do Brasil. **Desastres**. 2023b. Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/desastres/>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Movimento de massa**. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/deslizamentos/>. Acesso em: 22 jan. 2024.

- BUDHA, P. B.; PAUDYAL, K.; GHIMIRE, M. Landslide susceptibility mapping in eastern hills of Rara Lake, western Nepal. **Journal of Nepal Geological Society**, v. 50, n. 1, p. 125-131, 2016. <https://doi.org/10.3126/jngs.v50i1.22872>
- BÜRGER, G.; MURDOCK, T. Q.; WERNER, A. T.; SOBIE, S. R.; CANNON, A. J. Downscaling extremes – an intercomparison of multiple statistical methods for present climate. **Journal of Climate**, v. 25, n. 12, p. 4366-4388, 2012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00408.1>
- CHANG, C. L.; CHAO, Y. C. Using the analytical hierarchy process to assess the environmental vulnerabilities of basins in Taiwan. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, p. 2939-2945, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2162-z>
- CHE, V. B.; FONTIJN, K.; ERNST, G. G. J.; KERVYN, M.; ELBURG, M.; VAN RANST, E.; SUH, C. E. Evaluating the degree of weathering in landslide-prone soils in the humid tropics: the case of Limbe, SW Cameroon. **Geoderma**, v. 170, p. 378-389, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.013>
- CHEN, Y.-R.; YEH, C.-H.; YU, B. Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. **Natural Hazards**, v. 59, n. 3, p. 1261-1276, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9831-7>
- CHENG, L.; AGHAKOUCHAK, A.; GILLELAND, E.; KATZ, R. W. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. **Climatic Change**, v. 127, n. 2, p. 353-369, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1254-5>
- COLES, S. **An introduction to statistical modeling of extreme values**. London: Springer, 2001. (Springer Series in Statistics, 53).
- COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
- COORAY, P. G. Geological factors affecting landslide in Sri Lanka. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDE IN SRI LANKA. **Proceedings...** Sri Lanka: Landslide Studies and Services Division of the National Building Research Organisation, Ministry of Housing, Construction & Urban Development, 1994. p. 12-22, 1994.
- CORTEZ, B. N.; PIRES, G. F.; AVILA-DIAZ, A.; FONSECA, H. P.; OLIVEIRA, L. R. Nonstationary extreme precipitation in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 9, p. 1372-1383, 2022. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2075267>
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslide types and processes, transportation research board**. Washington, D.C.: U.S. National Academy of Sciences, 1996. (Special Report, 247).

DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, n. 3-4, p. 213-228, 2002.

[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)

DAI, F. C.; LEE, C. F.; ZHANG, X. H. GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. **Engineering Geology**, v. 61, n. 4, p. 257-271, 2001.

[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00028-X)

DEMIR, G.; AYTEKIN, M.; AKGÜN, A.; IKIZLER, S.; TATAR, O. A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods. **Natural Hazards**, v. 65, p. 1481-1506, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0418-8>

DHUNGANA, G.; GHIMIRE, R.; POUDEL, R.; KUMAL, S. Landslide susceptibility and risk analysis in Benighat Rural Municipality, Dhading, Nepal, **Natural Hazards Research**, v. 3, n. 2, p. 170-185, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.03.006>

DONATI, L.; TURRINI, M. C. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). **Engineering Geology**, v. 63, n. 3, p. 277-289, 2002.

[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00087-4)

DOU, J.; BUI, D. T.; YUNUS, A. P.; JIA, K.; SONG, X.; REVAUG, I.; XIA, H.; ZHU, Z. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata, Japan. **PLoS One**, v. 10, n. 7, 2015.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262>

EL ADLOUNI, S.; OUARDA, T. B. M. J.; ZHANG, X.; ROY, R.; BOBÉE, B. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model.

Water Resources Research, v. 43, W03410, p. 1-13, 2007.

<https://doi.org/10.1029/2005WR004545>

FISCHER, E. M.; KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 6, p. 560-564, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2617>

FOURIE, A. B. Predicting rainfall induced slope instability. **Geotechnical Engineering**, v. 119, n. 4, p. 211-218, 1996. <https://doi.org/10.1680/igeng.1996.28757>

<https://doi.org/10.1680/igeng.1996.28757>

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. **Scientific Data**, v. 2, 150066, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GEMITZI, A.; FALALAKIS, G.; ESKIOGLOU, P.; PETALAS, C. Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and GIS. **Global NEST Journal**, v. 13, n. 1, p. 28-40, 2011. <https://doi.org/10.30955/gnj.000734>

GILLELAND, E. **An introduction to statistical modeling of extreme values**: package ismev v. 1.42. 08 mai. 2018. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/ismev/index.html>. Acesso em: 26 jan. 2024.

GONZALEZ-ALVAREZ, A.; CORONADO-HERNÁNDEZ, O. E.; FUERTES-MIQUEL, V. S.; RAMOS, H. M. Effect of the non-stationarity of rainfall events on the design of hydraulic structures for runoff management and its applications to a case study at Gordo Creek watershed in Cartagena de Indias, Colombia. **Fluids**, v. 3, n. 2, 27, 2018.

<https://doi.org/10.3390/fluids3020027>

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, n. 1-4, p. 181-216, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. T. **The landslide handbook**: a guide to understanding landslides. Reston: U.S. Geological Survey, 2008. 129 p. (Circular, 1325). Disponível em: https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf. Acesso em: out. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Geociências. **Populações em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101589>. Acesso em: 22 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Susceptibilidade a deslizamentos do Brasil**: primeira aproximação. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101684>. Acesso em: 30 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação Técnica do Censo Demográfico. **Censo Demográfico 2022**: população e domicílios: primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102011>. Acesso em: 22 jan. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014**: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. New York, NY: University of Cambridge, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf. Acesso em: 02 fev. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023**: synthesis report. Geneva, Switzerland: WMO, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 02 fev. 2024.

JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 81, n. 348, p. 158-171, 1955. <https://doi.org/10.1002/qj.49708134804>

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 25, n. 8-12, p. 1287-1304, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8)

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. **British Journal of Statistical Psychology**, v. 9, n. 1, p. 196, 1956.

KHARIN, V.; FLATO, G. M.; ZHANG, X.; GILLETT, N. P.; ZWIERS, F.; ANDERSON, K. J. Risks from climate extremes change differently from 1.5°C to 2.0°C depending on rarity. **Earth's Future**, v. 6, n. 5, p. 704-715, 2018. <https://doi.org/10.1002/2018EF000813>

LEE, M. L.; NG, K. Y.; HUANG, Y. F.; LI, W. C. Rainfall-induced landslides in Hulu Kelang area. **Natural Hazards**, v. 70, p. 353-375, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0814-8>

LEROUEIL, S.; VAUNA, T. J.; PICARELLI, L.; LOCAT, J.; FAURE, R. M.; LEE, H. A geotechnical characterization of slope movements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 7th, 1996. **Proceedings...** Trondheim, Norway, 1996. p. 53-74.

LIU, L.; LI, S.; LI, X.; JIANG, Y.; WEI, W.; WANG, Z.; BAI, Y. An integrated approach for landslide susceptibility mapping by considering spatial correlation and fractal distribution of clustered landslide data. **Landslides**, v. 16, n. 4, p. 715-728, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-01122-2>

LIU, M.; MA, X.; YIN, Y.; ZHANG, Z.; YIN, J.; ULLAH, I.; ARSHAD, M. Non-stationary frequency analysis of extreme stream-flow disturbance in a typical ecological function reserve of China under a changing climate. **Ecohydrology**, v. 14, n. 7, e2323, 2021. <https://doi.org/10.1002/eco.2323>

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MCCOLL, S. T. Landslide causes and triggers. In: SHRODER, J. F.; DAVIES, T. (Eds.). **Landslide hazards, risks, and disasters**. Cambridge: Academic Press, 2015. cap. 2, p. 17-42. (Hazards and Disasters Series). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1>

NEFESLIOGLU, H. A.; SEZER, E. A.; GOKCEOGLU, C.; AYAS, Z. A modified analytical hierarchy process (M-AHP) approach for decision support systems in natural hazard assessments. **Computers & Geosciences**, v. 59, p. 1-8, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.05.010>

OUARDA, T. B. M. J.; CHARRON, C. Changes in the distribution of hydro-climatic extremes in a non-stationary framework. **Scientific Reports**, v. 9, 8104, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44603-7>

RAHARDJO, H.; LIM, T. T.; CHANG, M. F.; FREDLUND, D. G. Shear-strength characteristics of a residual soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 32, n. 1, 1995. <https://doi.org/10.1139/t95-005>

RAHARDJO, H.; ONG, T. H.; REZAUR, R. B.; LEONG, E. C. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. **Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 12, p. 1532-1543, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2007\)133:12\(1532\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:12(1532))

REGMI, A. D.; YOSHIDA, K.; DHITAL, M. R.; DEVKOTA, K. Effect of rock weathering, clay mineralogy, and geological structures in the formation of large landslide, a case study from Dumre Besei landslide, Lesser Himalaya Nepal. **Landslides**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0311-7>

REGMI, A. D.; YOSHIDA, K.; DHITAL, M. R.; PRADHAN, B. Weathering and mineralogical variation in gneissic rocks and their effect in Sangrumba Landslide, East Nepal. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, p. 2711-2727, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2649-8>

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York, NY: McGraw-Hill, 1980.

SALAS, J. D.; OBEYSEKERA, J.; VOGEL, R. M. Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 3, p. 325-352, 2018. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426858>

SING, H.; HUAT, B. B. K. Formation and classification of tropical residual soils. In: HUAT, B. B. K.; TOLL, D. G.; PRASAD, A. (Eds.). **Handbook of tropical residual soils engineering**. Boca Raton, CA: CRC Press, 2012. p. 21-62. <https://doi.org/10.1201/b12302-2>

SMITH, R. L. Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases. **Biometrika**, v. 72, n. 1, p. 67-90, 1985. <https://doi.org/10.2307/2336336>

STEAD, D.; WOLTER A. A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology. **Journal of Structural Geology**, v. 74, p. 1-23, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.JSG.2015.02.002>

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. Hoboken: John Wiley, 1967.

TRAMBLAY, Y.; BADI, W.; DRIQUECH, F.; EL ADLOUNI, S.; NEPPEL, L.; SERVAT, E. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. **Global and Planetary Change**, v. 82-83, p. 1040114, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.12.002>

TRAMBLAY, Y.; NEPPEL, L.; CARREAU, J.; NAJIB, K. Analyse fréquentielle non-stationnaire des pluies extrêmes dans le Sud de la France. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 2, p. 280-294, 2013. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.754988>

TSAI, H.-T.; TSENG, C.-J.; TZENG, S.-Y.; WU, T.-J.; DAY, J.-d. The impacts of natural hazards on Taiwan's tourism industry. **Natural Hazards**, v. 62, p. 83-91, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0034-z>

VAN WESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3-4, p. 112-131, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>

VASILIADES, L.; GALIATSATOU, P.; LOUKAS, A. Nonstationary frequency analysis of annual maximum rainfall using climate covariates. **Water Resources Management**, v. 29, p. 339-358, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0761-5>

VOJTEKOVA, J.; VOJTEK, M. Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. **Geomatics, Natural Hazards Risk**, v. 11, n. 1, p. 131-148, 2020. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1713233>

VU, T. M.; MISHRA, A. K. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 999-1010, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.090>

WANG, Q.; GUO, Y.; LI, W.; HE, J.; WU, Z. Predictive modeling of landslide hazards in Wen County, northwestern China based on information value, weights-of-evidence, and certainty factor. **Geomatics, Natural Hazards Risk**, v. 10, n. 1, p. 820-835, 2019. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1549111>

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. **Journal of Climate**, v. 26, n. 11, p. 3904-3918, 2013. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>

WU, Q.; YE, S.; WU, X.; CHEN, P. Risk assessment of earth fractures by constructing an intrinsic vulnerability map, a specific vulnerability map, and a hazard map, using Yuci City, Shanxi, China as an example. **Environmental Geology**, v. 46, p. 104-112, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1020-5>

XAVIER, A. C. F.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; BLAIN, G. C.; MORAIS, M. V. B.; ALMEIDA, D. S.; RAFEE, S. A. A.; MARTINS, L. D.; SOUZA, R. A. F.; FREITAS, E. D.; MARTINS, J. A. Stationary and non-stationary detection of extreme precipitation events and trends of average precipitation from 1980 to 2010 in the Paraná River basin, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 2, p. 1197-1212, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6265>

YANG, L.; LI, J.; SUN, H.; GUO, Y.; ENGEL, B. A. Calculation of nonstationary flood return period considering historical extraordinary flood events. **Journal Flood Risk Management**, v. 12, n. 2, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12463>

ZADOROVA, T.; PENIZEK, V. Formation, morphology, and classification of colluvial soils: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 4, p. 577-591, 2018. <https://doi.org/10.1111/ejss.12673>

ZHANG, L. L.; ZHANG, J.; ZHANG, L. M.; TANG, W. H. Stability analysis of rainfall induced slope failure: a review. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering**, v. 164, n. 5, p. 299-316, 2011. <https://doi.org/10.1680/geng.2011.164.5.299>

ZHOU, Q.; MIKKELSEN, P. S.; HALSNAES, K.; ARNBJERG-NIELSEN, K. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. **Journal of Hydrology**, v. 414-415, p. 539-549, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.031>