

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

SOPHIA DE MONTMORENCY BOTELHO PESTANA

Aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) à Fragilidade Ambiental: Estudo de Caso das Enchentes de Maio de 2024 no Rio Grande do Sul

Application of Nature-Based Solutions (NbS) to Environmental Fragility: A Case Study of the May 2024 Floods in Rio Grande do Sul

**São Paulo
2025**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS
HUMANAS DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

SOPHIA DE MONTMORENCY BOTELHO PESTANA

**Aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) à Fragilidade
Ambiental: Estudo de Caso das Enchentes de Maio de 2024 no
Rio Grande do Sul**

Trabalho de Graduação Integrado (TGI)
apresentado ao Departamento de Geografia da
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências
Humanas, da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Geografia.

Área de Concentração: Geografia Física

Orientador: Prof. Dr. Fernando Shinji
Kawakubo.

**São Paulo
2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação

Serviço de Biblioteca e Documentação Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
da Universidade de São Paulo

P 476
a
Pestana, Sophia de Montmorency Botelho
Aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) à
Fragilidade Ambiental: Estudo de Caso das Enchentes
de Maio de 2024 no Rio Grande do Sul / Sophia de
Montmorency Botelho Pestana; orientador Fernando
Shinji Kawakubo - São Paulo, 2025.
93 f.

TGI (Trabalho de Graduação Individual) - Faculdade
de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da
Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia.

1. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS. 2. GEOMORFOLOGIA
APLICADA. I. Kawakubo, Fernando Shinji , orient. II.
Título.

PESTANA, Sophia de Montmorency Botelho Pestana. Aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) à Fragilidade Ambiental: Estudo de Caso das Enchentes de Maio de 2024 no Rio Grande do Sul. 2025. Trabalho de Graduação Individual (TGI) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Fernando Shinji Kawakubo

Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____ : **Instituição:** _____

Julgamento: _____ : **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____ : **Instituição:** _____

Julgamento: _____ : **Assinatura:** _____

AGRADECIMENTOS

Faz sete anos que deixei Porto Alegre rumo a São Paulo, em uma trajetória que só foi possível graças ao apoio constante da minha família e à presença de amizades que se fortaleceram ao longo do caminho.

Agradeço, com todo o meu amor, aos meus pais, Sérgio e Samya, e aos meus irmãos — Sérgio Luís, Sidney, Natália, Luiz, Gabriel, Melissa e Sarah — por mesmo a distância, serem meu alicerce e inspiração diária.

À Raissa e Thaís Oliveira, minhas irmãs de outra mãe, pela amizade incondicional.

Aos meus melhores amigos, Ana Luísa Ferreira, Jefte Alves, Marcela Amorim e João Vitor Oliveira, por me acompanharem com generosidade e afeto nos momentos bons e difíceis.

Ao Basquete Feminino da FFLCH e ao Basquete Feminino da Seleção USP, por me oferecerem acolhimento, força e pertencimento em quadra e fora dela.

Ao WRI Brasil, especialmente aos meus *coordenadores* Viviane Sobral e Carlos Leandro Cordeiro, por acreditarem no meu trabalho e me ensinarem tanto.

À Universidade de São Paulo, por ser mais que um espaço de formação acadêmica — um lugar onde cresci, me transformei e encontrei sentido no conhecimento.

A todas essas pessoas e instituições, minha mais sincera gratidão.

“Os que têm a oportunidade de se consagrar aos estudos científicos deverão ser os primeiros a pôr seus conhecimentos a serviço da humanidade.”

Karl Marx

RESUMO

PESTANA, Sophia de Montmorency Botelho Pestana. **Aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) à Fragilidade Ambiental: Estudo de Caso das Enchentes de Maio de 2024 no Rio Grande do Sul.** 2025. Trabalho de Graduação Individual (TGI) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Este trabalho analisa a aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para mitigar a fragilidade ambiental associada às enchentes no Rio Grande do Sul, com foco na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG). O objetivo principal é avaliar como alterações no uso e cobertura do solo impactam a fragilidade ambiental e propor estratégias de restauração florestal como medida de resiliência. A metodologia baseia-se na abordagem de Ross (1994; 1990) por tabela bidimensional, utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para mapear a fragilidade potencial ambiental e sob SbN, entre 1985 e 2023, correlacionando-a com áreas afetadas pelas enchentes. Os dados utilizados no mapeamento incluem declividade, pedologia, uso do solo e a mancha de inundação do evento de 2024 na região, reclassificados em graus de fragilidade (de 1 a 5). Os resultados revelam que 86,2% da RHG apresenta fragilidade ambiental elevada, com aumento de 87,7% nas áreas instáveis entre 1985 e 2023, impulsionado pela expansão agropecuária e urbana. As sub-bacias do Taquari-Antas e Baixo Jacuí destacam-se como as mais críticas em todos os cenários estatísticos. Embora a simulação com SbN evidencie um aumento em áreas classificadas como “Muito estáveis” e “Estáveis”, a RHG ainda concentrou graus elevados de instabilidade, indicando que a restauração não elimina totalmente a fragilidade em áreas naturalmente predispostas à erosão. Conclui-se que a magnitude do potencial de desastre não se deve apenas às mudanças climáticas, mas também à ausência de planejamento territorial adequado, que considere as fragilidades dos ambientes. A permanência de comunidades em áreas de risco reforça a urgência de que o Estado reveja padrões de uso e ocupação do solo, principalmente diante de cenários climáticos extremos.

Palavras-chave: Restauração Florestal, Planejamento Territorial, Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba, Geoprocessamento.

ABSTRACT

PESTANA, Sophia de Montmorency Botelho Pestana. **Application of Nature-Based Solutions (NbS) to Environmental Fragility: A Case Study of the May 2024 Floods in Rio Grande do Sul.** 2025. Trabalho de Graduação Individual (TGI) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

This study analyses the application of Nature-Based Solutions (NbS) to mitigate environmental fragility associated with flooding in Rio Grande do Sul, focusing on the Guaíba Basin Hydrographic Region (RHG). The main objective is to assess how changes in land use and land cover impact environmental fragility and propose forest restoration strategies as a measure of resilience. The methodology is based on Ross's (1994; 1990) two-dimensional table approach, using Geographic Information Systems (GIS) to map potential environmental fragility and under NBS between 1985 and 2023, correlating it with areas affected by flooding. The data used in the mapping include slope, pedology, land use and the flood stain of the 2024 event in the region, reclassified into degrees of fragility (from 1 to 5). The results reveal that 86.2% of the RHG presents high environmental fragility, with an 87.7% increase in unstable areas between 1985 and 2023, driven by agricultural and urban expansion. The Taquari-Antas and Baixo Jacuí sub-basins stand out as the most critical in all statistical scenarios. Although the simulation with SbN shows an increase in areas classified as ‘Very stable’ and ‘Stable,’ the RHG still concentrated high degrees of instability, indicating that restoration does not completely eliminate fragility in areas naturally prone to erosion. It is concluded that the magnitude of the disaster potential is not only due to climate change, but also to the absence of adequate territorial planning that considers the fragility of the environments. The permanence of communities in risk areas reinforces the urgency for the State to review land use and occupation patterns, especially in the face of extreme climate scenarios.

Keywords: Forest Restoration, Territorial Planning, Guaíba Basin Hydrographic Region, Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Municípios gaúchos que tiveram Estado de Calamidade Pública (ECP) e Situação de Emergência (SE) reconhecidos pelo MIDR em maio de 2024.....	15
Figura 2: Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.....	19
Figura 3: Resposta Hidrológica de uma bacia hidrográfica.....	20
Figura 4: Tipos de leito fluvial.....	21
Figura 5: A síndrome da planície de inundação.....	22
Figura 6: Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica antes e depois do processo de urbanização.....	23
Figura 7: Alteração de cheias severas em rios médios e grandes no Brasil e na América do Sul	28
Figura 8: Diagrama conceitual ilustrando superfícies impermeáveis e permeáveis.....	30
Figura 9: Mapa de localização da área de estudo no recorte temporal das enchentes de maio de 2024 no Rio Grande do Sul.....	32
Figura 10: Mapa de Hidrografia na RHG.....	35
Figura 11: Carta Altimétrica na RHG.....	37
Figura 12: Mapa das Unidades Geomorfológicas na RHG.....	38
Figura 13: Mapa das Unidades Geológicas na RHG.....	39
Figura 14: Mapa da Pedologia na RHG.....	40
Figura 15: Distribuição Espacial da Temperatura e Precipitação Médias Anuais no Rio Grande do Sul.....	43
Figura 16: Mapa do Uso do Solo na RHG.....	48
Figura 17: Fluxograma das atividades realizadas para o desenvolvimento operacional da pesquisa.....	57
Figura 18: Fluxograma das atividades realizadas para a reclassificação dos dados quanto ao grau de Fragilidade Ambiental.....	59
Figura 19: Mapa da Fragilidade Potencial na RHG.....	62
Figura 20: Deslizamentos de encostas na Serra Geral no município de Santa Tereza, Vale do Rio Taquari.....	65
Figura 21: Planície de inundação no Vale do rio Taquari em Roca Sales com destaque para deslizamentos de encostas (em vermelho).....	66

Figura 22: Comparativo entre os mapas de Fragilidade Ambiental entre os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023.....	67
Figura 23: Extensão da inundação no Vale do Taquari no Rio Grande do Sul.....	71
Figura 24: Área inundada no município de Encantado, no Vale do Taquari.....	72
Figura 25: Área inundada no asfalto da Ponte do Fandango.....	74
Figura 26: Mapa da Fragilidade Ambiental sob SbNs.....	77
Figura 27: Área inundada ao entorno da Área de Proteção Ambiental do Delta do Jacuí.....	79
Figura 28: Rua alagada pela enchente no município de Eldorado do Sul.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribuição das classes de uso e ocupação do solo na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023.....	44
Gráfico 2: Distribuição das classes de agropecuária na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023.....	45
Gráfico 3: Distribuição das classes de Áreas não Vegetadas na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023.....	46
Gráfico 4: Distribuição das classes de Áreas Vegetadas na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023.....	47
Gráfico 5: Distribuição por área em hectare da Fragilidade Potencial e Emergente na RHG.....	63
Gráfico 6: Distribuição por área em hectare da Fragilidade Ambiental da RHG nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023.....	68
Gráfico 7: Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Taquari - Antas (VIII).....	70
Gráfico 8: Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Baixo Jacuí (III).....	73
Gráfico 9: Comparativo entre os valores de Fragilidade Potencial e Fragilidade Ambiental dos anos de 1985 a 2023.....	75
Gráfico 10: Comparaçao entre a distribuição por área em hectare da Fragilidade Ambiental sob Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e a Fragilidade Ambiental em 2023 na RHG.....	78

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Unidades Ecodinâmicas por Ross (1990).....	26
Tabela 2: Distribuição e Caracterização das Classes de Solos na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG).....	41
Tabela 3: Grau de Fragilidade Ambiental associada por sua variável na referente pesquisa..	49
Tabela 4: Classificação do tipo de solo para Fragilidade Ambiental.....	51
Tabela 5: Classificação do tipo do uso do solo para Fragilidade Ambiental.....	52
Tabela 6: Classificação do tipo do uso do solo para Fragilidade Ambiental sob SbNs.....	54
Tabela 7: Exemplo de expressão por cruzamento das variáveis pela tabela bidimensional para seleção do grau de fragilidade sob SbN predominante.....	60
Tabela 8: Análise de tendência de 1985 vs 2023 por sub-bacia na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG).....	69
Tabela 9: Análise de tendência de Fragilidade Potencial e Fragilidade sob Soluções Baseadas na Natureza (SbN).....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

COP – Conferência das Partes

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

DRI – Data Research & Insights

ECP – Estado de Calamidade Pública

GEE – Google Earth Engine

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPBES – Plataforma Intergovernamental Científica e Política sobre a Biodiversidade e os Serviços Ecossistêmicos

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IUCN – União Internacional para a Conservação da Natureza

LID – Desenvolvimento de Baixo Impacto

MDE – Modelo Digital de Elevação

MIDR – Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

RHB – Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba

RHL – Bacias Litorâneas

RHU – Bacia do Rio Uruguai

SEPLAG – Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima na Conferência das Partes

VAB – Valor Adicionado Bruto

SUMÁRIO

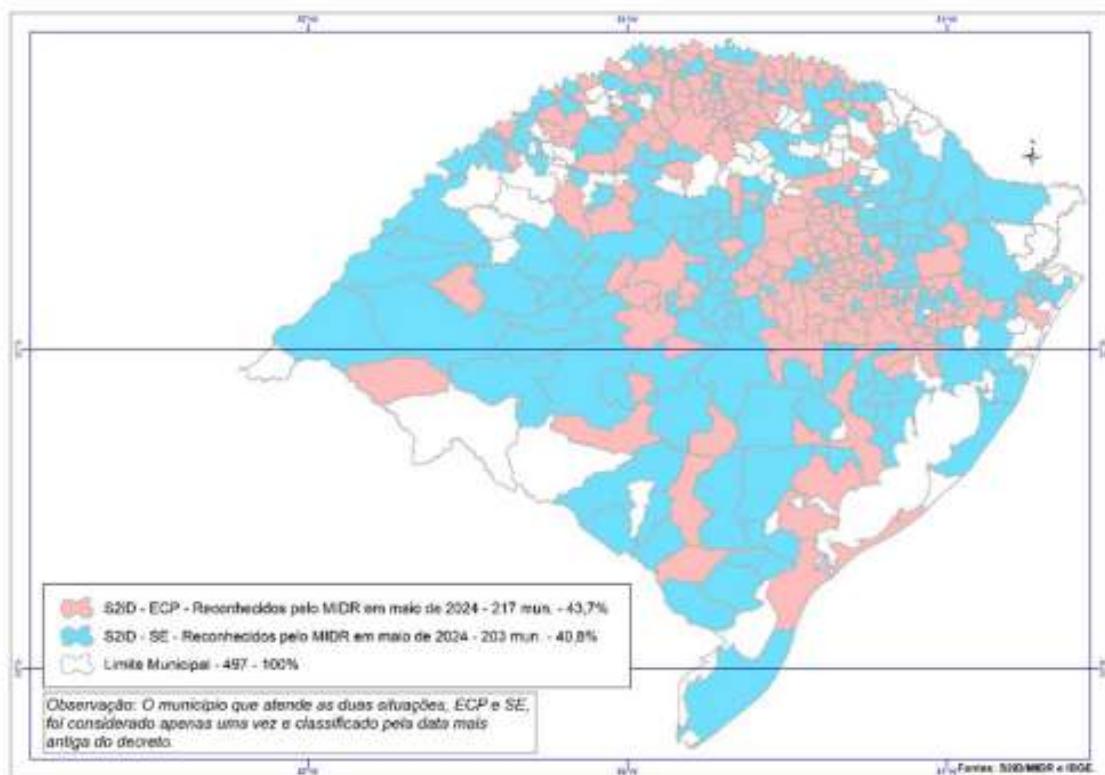
1. INTRODUÇÃO	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Enchentes e Inundações	18
2.2. Fragilidade Ambiental	23
2.3. Mudanças Climáticas e Soluções Baseadas na Natureza (SbN)	26
3. ÁREA DE ESTUDO	31
3.1. Aspectos Físicos	32
3.1.1. <i>Hidrografia</i>	33
3.1.2. <i>Relevo</i>	35
3.1.2.1. Altimetria	35
3.1.2.2. Unidades Geomorfológicas	36
3.1.2.3. Unidades Geológicas	38
3.1.3. <i>Pedologia</i>	39
3.1.4. <i>Clima</i>	41
3.2. Aspectos de Uso e Ocupação	42
4. METODOLOGIA	48
4.1. Procedimentos de Pesquisa	48
4.1.1 <i>Fragilidade Ambiental</i>	48
4.1.2. <i>Fragilidade Ambiental sob SbN</i>	53
4.2. Desenvolvimento Operacional	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1. Fragilidade Potencial na RHG	60
5.2. Fragilidade Ambiental na RHG	66
5.3. Fragilidade Ambiental sob SbN na RHG	76
6. CONCLUSÃO	82
7. REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A - GRÁFICOS COMPLEMENTARES	90

1. INTRODUÇÃO

Em 2008, segundo o relatório anual de estatísticas de desastres do *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED), o Brasil estava em 10º lugar entre os países do mundo com maior número de vítimas relacionadas aos desastres naturais (TOMINAGA et al., 2009). Esses desastres, especialmente os climatológicos e hidrológicos, revelam as vulnerabilidades urbanas e a deficiência da infraestrutura pública, expondo a população a riscos significativos. O estado do Rio Grande do Sul, historicamente afetado por enchentes e inundações, registrou pelo menos oito eventos de grande magnitude desde a histórica enchente de 1941 (VALENTE, 2024).

O exemplo mais grave ocorreu em maio de 2024, quando o estado enfrentou a maior tragédia socioambiental de sua história. Segundo informações dos boletins sobre o impacto das chuvas no RS emitidos pela Defesa Civil, após o evento, dos 497 municípios gaúchos, 96% foram afetados com aproximadamente 2.400 milhões de pessoas impactadas. No relatório da Agência Nacional de Águas (ANA, 2025), mais de 15.000 km² ficaram submersos, 146 mil pessoas foram desalojadas, além de registradas 183 mortes confirmadas, 27 de desaparecidos e 806 feridos. Ao todo, 84.5% dos municípios decretaram Estado de Calamidade Pública (ECP) e Situação de Emergência reconhecidas pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) como mostrado na **Figura 1**.

Figura 1: Municípios gaúchos que tiveram Estado de Calamidade Pública (ECP) e Situação de Emergência (SE) reconhecidos pelo MIDR em maio de 2024.



Fonte: S2ID/MIDR e IBGE apud ANA, 2025.

De acordo com o Data Research & Insights (DRI) da Universidade de Passo Fundo, a enchente causou uma queda de 2,61% nas atividades produtivas em diversos setores da economia, além de uma redução de 2,46% no PIB do estado (MONTOYA et al., 2024, apud ANA, 2025). Esses números são considerados altos, especialmente por refletirem perdas significativas em um curto período de tempo. No aspecto social, a proliferação de doenças como leptospirose, que até o dia 20 de maio de 2024, havia sido notificado pelo menos 5.659 casos da doença, dos quais 404 foram confirmados segundo dados da Secretaria Estadual de Saúde do Rio Grande do Sul (SUL21, 2024), causados diretamente pelo alto volume de resíduos sólidos nas áreas urbanas.

Esses impactos são potencializados pela própria configuração territorial do Rio Grande do Sul. Devido à sua extensa área e heterogeneidade, o estado combina altitudes elevadas, declividades acentuadas e solos rasos – características que aceleram o escoamento superficial (ANA, 2025). Essa dinâmica é ainda mais crítica quando analisada sob a

perspectiva das duas principais bacias hidrográficas do estado: a do rio Uruguai, situada nos ao norte e oeste, e a da Lagoa dos Patos, abrangendo as regiões central, leste e sul.

Em sua publicação recente, a ANA (2025) destaca que, na bacia do rio Uruguai, essas cheias são geralmente associadas a episódios de precipitação intensa com duração de aproximadamente 2 a 5 dias devido suas áreas de cabeceiras. Já na bacia da Lagoa dos Patos, cuja configuração geográfica é predominantemente composta por extensas planícies de inundação, os impactos tendem a ser mais severos, como evidenciado nas enchentes que atingiram diversas cidades em 2024, incluindo a capital, Porto Alegre.

Entretanto, nota-se que não só pelo seu aspecto geomorfológico, o fator climático corroborou significativamente para o desastre. Com a influência do El Niño entre os anos de 2023 e 2024, a ocorrência de fenômenos meteorológicos atípicos, como chuvas intensas em curtos períodos e ondas de calor fora dos padrões históricos contribuíram significativamente para a intensificação de alagamentos e deslizamentos no Rio Grande do Sul. As precipitações extremas resultaram em cheias recorde em rios como o Guaíba, Taquari e Jacuí, com vazões superiores aos valores de projeto de barragens e usinas hidrelétricas (ANA, 2025). Esse contexto evidencia a importância de compreender tais ocorrências não apenas como eventos pontuais, mas como manifestações de processos mais amplos que revelam a vulnerabilidade ambiental do território.

Diante desse cenário, o aumento na frequência de chuvas intensas acende um alerta sobre a potencial escalada de desastres no futuro. Esse debate encontra respaldo no conceito de fragilidade ambiental, proposto por Ross (1994) em seu artigo “Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados”. Segundo o autor, a fragilidade refere-se à susceptibilidade de ambientes naturais ou modificados pelo homem (antropizados) sofrerem degradação diante de intervenções humanas ou de processos naturais, um conceito-chave para entender a crise atual. À medida que a fragilidade do ambiente aumenta, como observado no Rio Grande do Sul, pequenas alterações no fluxo climático podem desencadear desequilíbrios profundos nos ecossistemas.

Nesse sentido, a fragilidade dos ambientes ou somente fragilidade ambiental, por ser uma linha de preocupação da geomorfologia aplicada ao planejamento, se pauta na referente pesquisa como uma metodologia que busca analisar a relação entre desastres socioambientais, inundações e enchentes a aspectos morfodinâmicos do estado do Rio Grande do Sul, tais como relevo, pedologia e uso e ocupação do solo. Ross (1994) enfatiza que esses processos não ocorrem de forma isolada, mas sim de maneira interdependente, afetando o grau de estabilidade do ecossistema como um todo.

Paralelo aos estudos de fragilidades, dado a imprevisibilidade do comportamento climático, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) vêm sendo reconhecidas como estratégias eficazes no enfrentamento de enchentes em ambientes antropizados. A incorporação no planejamento como práticas ao Desenvolvimento de Baixo Impacto, a criação de zonas úmidas artificiais e o conceito de “cidade-esponja” (ALOSCIOUS et al. 2025) exemplificam sua aplicabilidade na prevenção imediata de inundações. Entretanto, poucos estudos científicos investigam sua execução de forma empírica em áreas vulneráveis, o que representa uma oportunidade para explorar tais soluções no planejamento territorial do Rio Grande do Sul.

Nesse contexto, a abordagem proposta busca mapear áreas com diferentes graus de fragilidade, visando contribuir para sua mitigação por meio da aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN). A pesquisa, embora não utilize modelos dinâmicos de simulação de processos hidrológicos e sedimentológicos, fundamenta-se em um modelo de pré-disposição empírico e estático, que analisa a fragilidade ambiental a partir das características estruturais da paisagem. A aplicação dessas medidas, aliada a um zoneamento territorial eficiente, pode não apenas reduzir a vulnerabilidade no Rio Grande do Sul, mas também oferecer um modelo adaptável a outras regiões frente aos desafios das mudanças climáticas.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é analisar como a alteração do uso e cobertura do solo impacta a fragilidade ambiental em uma região hidrográfica do estado do Rio Grande do Sul e, consequentemente, sua fragilidade a enchentes.

Como hipótese central, portanto, considera-se que a região já possui uma predisposição natural a enchentes e, com a intervenção antrópica nesses ambientes, o grau de fragilidade tende a aumentar. No entanto, à medida que o ambiente é modificado por práticas mais conservacionistas, como a restauração florestal, sua resiliência é reforçada. Consequentemente, a fragilidade diminui, e o risco associado a eventos extremos – mesmo em cenários de mudanças climáticas – é estabilizado, tornando-se mais seguro para a população.

Para objetivos específicos, temos:

- Mapear áreas de fragilidade ambiental potencial e emergente para os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023;

- Correlacionar áreas de alto nível de fragilidade ambiental a áreas atingidas pelas enchentes acometidas no Rio Grande do Sul de maio a abril de 2024.
- Apresentar cenário de restauração florestal, segundo o conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SbN).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Enchentes e Inundações

Dentre os diversos tipos de desastres, as inundações se destacaram como o terceiro evento mais registrado no país entre 1991 e 2012, com um total de 4.691 ocorrências — o equivalente a 12% dos registros, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013). Nesse sentido, ao aprofundar o estudo sobre esses eventos, é comum encontrar na literatura a associação entre enchentes e inundações.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (CARVALHO et al, 2007), esses processos são frequentemente desencadeados por chuvas de diferentes intensidades e frequência, sendo agravados por intervenções antrópicas - impermeabilização do solo, retificação dos rios e redução da capacidade de escoamento. Apesar das semelhanças, é fundamental destacar que enchentes e inundações são eventos distintos, o que torna necessária a sua conceituação adequada. Segundo o Instituto:

“As enchentes ou cheias são definidas pela elevação do nível d’água no canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar.

As inundações são um acúmulo momentâneo de águas em determinados locais por deficiência no sistema de drenagem.” (CARVALHO et al., 2007, pg. 90 e 91)

Figura 2: Perfil esquemático do processo de encheante e inundaçāo



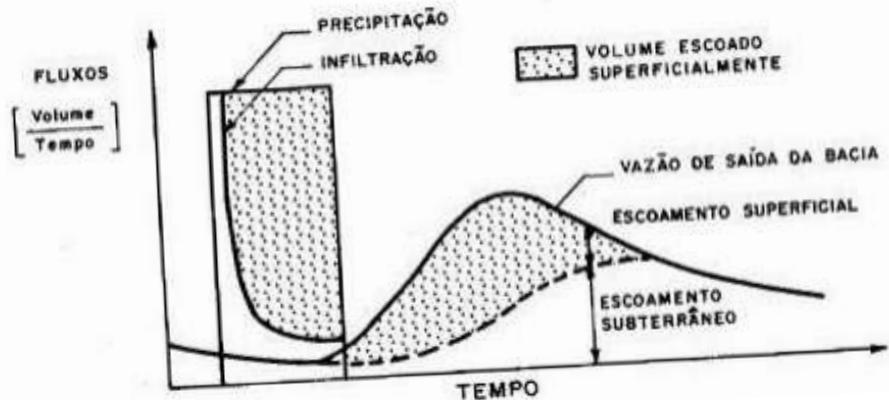
Fonte: CARVALHO et al., 2007.

A diferenciação entre enchente e inundação depende do espaço geomorfológico ocupado pelas águas em diferentes estágios do curso fluvial, conforme ilustrado na **Figura 2**. Em situação normal, o rio mantém seu fluxo no leito menor, que corresponde ao canal por onde a água escoa habitualmente. Quando há aumento do volume hídrico e esse limite é superado, ocorre a enchente, caracterizada pelo extravasamento das águas para o leito maior ou planície de inundação. Já a inundação se estabelece quando o transbordamento ultrapassa essas unidades geomorfológicas, alcançando vertentes e terraços adjacentes. A compreensão dessa dinâmica é fundamental, pois demonstra como a configuração do relevo condiciona tanto a extensão quanto a gravidade dos eventos de cheia (CHRISTOFOLETTI, 1980).

2.1.1. Geomorfologia Fluvial

A dinâmica entre as formas do relevo e o leito fluvial estão ligados a geomorfologia fluvial, pois, em escala de bacia hidrográfica, o escoamento superficial evidencia a interação entre características morfométricas e processos hidrológicos, revelando como os fatores naturais influenciam os eventos de elevação do nível hídrico. Conforme destacam Christofolletti (1980) e Lino (2018), uma bacia hidrográfica funciona como uma unidade hidrogeomorfológica integrada, responsável por modular espacial e temporalmente a conversão da precipitação em vazão. A eficácia desse mecanismo – condicionada pela resposta da bacia ao aporte hídrico – é determinante na intensificação ou atenuação de eventos extremos, definindo assim a magnitude das ocorrências de enchentes e inundações.

Figura 3: Resposta Hidrológica de uma bacia hidrográfica



Fonte: Tucci, 2013 apud Lino, 2018

Como ilustrado na **Figura 3**, quando chove em uma bacia hidrográfica, parte da água infiltra no solo e alimenta o escoamento subterrâneo e o restante da água que não foi absorvido, escoa pela superfície até chegar os rios, aumentando o volume de água que saí da bacia. Esse tempo de resposta não acontece de forma imediata, sendo executada em um intervalo entre o momento em que a chuva atinge seu ponto mais intenso e o momento em que a vazão dos rios atinge seu pico.

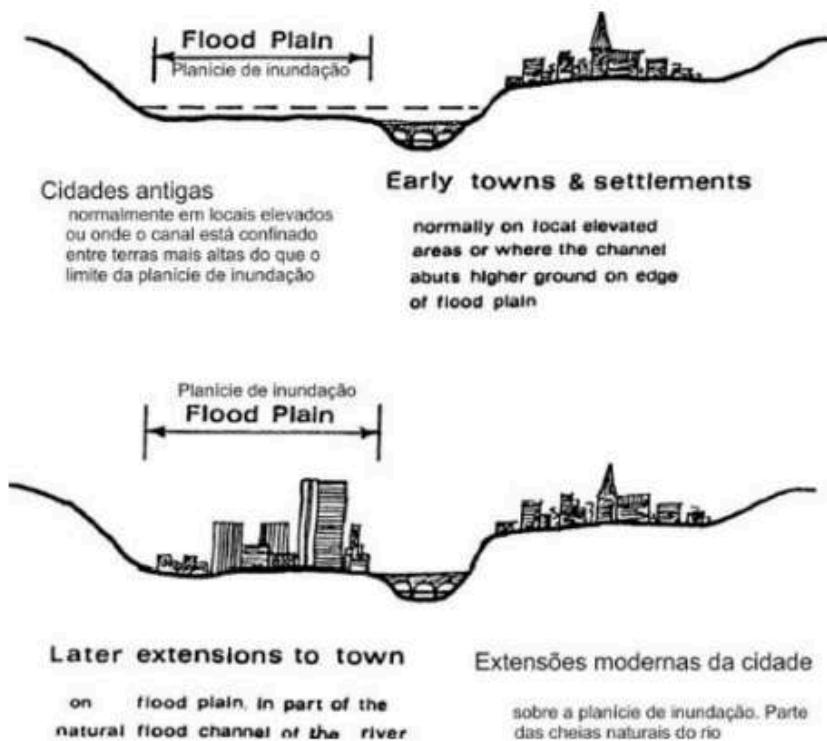
Do ponto de vista geomorfológico, esse tempo de resposta é diretamente influenciado pelas características físicas do relevo, uma vez que a precipitação sobre uma bacia hidrográfica inicia o escoamento superficial, que se move rapidamente nas áreas a montante (partes mais alta) para as áreas a jusante (partes mais baixas) da bacia (WOLLMANN, 2015). Nesse contexto, as regiões mais vulneráveis quando a descarga hídrica ultrapassa sua cota natural são as planícies de inundação (CHRISTOFOLLETTI, 1980), conhecidas no Brasil como várzeas. Nessas áreas, a presença de depósitos sedimentares específicos e a topografia favorecem a intensificação do processo de enchentes, especialmente em períodos de elevada precipitação.

2.1.2. A ação antrópica

Em um estudo desenvolvido por Luz (2020), destaca que a expansão urbana moderna frequentemente ocorre de forma desordenada, desconsiderando as dinâmicas hidrológicas e físicas do relevo e ocupando áreas de risco, como várzeas e planícies de inundação. A **Figura 4** ilustra como cidades situadas em zonas naturalmente inundáveis contribuem para a

chamada "síndrome da planície de inundação", na qual a própria ocupação inadequada aumenta a vulnerabilidade da sociedade a desastres naturais.

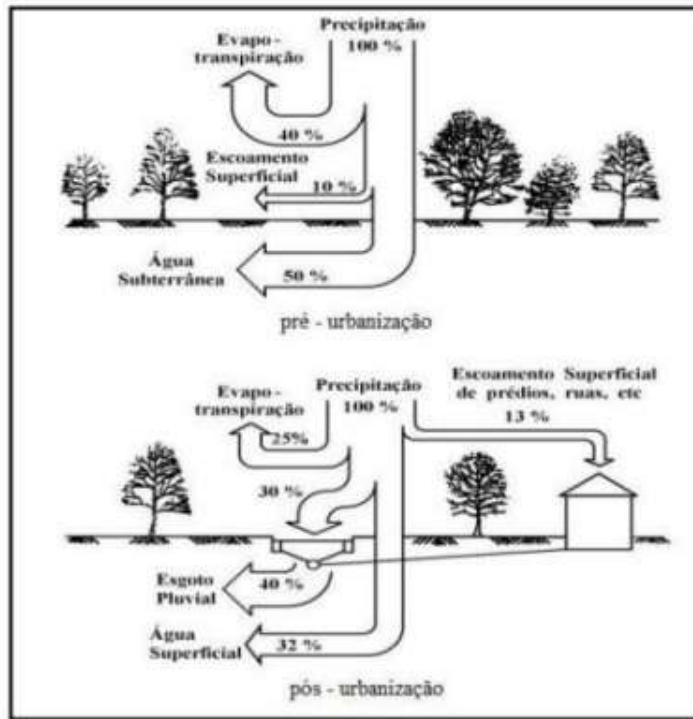
Figura 4: A síndrome da planície de inundação



Fonte: Hockin, Whittle e Bailey, 1978 apud Luz, 2020, pg. 342

Devido ao avanço das cidades modernas para áreas mais baixas, nota-se que o regime hidrológico dos rios funciona como um indicador sensível dos impactos humanos nos sistemas naturais, já que processos como circulação e infiltração da água são diretamente influenciados pelas características ambientais do entorno.

Figura 5: Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica antes e depois do processo de urbanização.



Fonte: Decina, 2012 apud Luz, 2020.

Isso pode ser evidenciado na **Figura 5**, uma vez que uma parte da quantidade de água absorvida pelo solo, pode ser dividida por dois momentos históricos principais: pré-urbanização e pós- urbanização. Na pré-urbanização, cerca de 40% do fluxo de água que entra no sistema é devolvido para a atmosfera na forma de evaporação ou voltava para atmosfera pelas plantas (evapo-transpiração); 25% deste volume é escoado pelos rios e lagos (escoamento superficial) e 35% é absorvido pelo solo e adentra no lençol freático (infiltração). No período de pós-urbanização, por sua vez, quando criou-se infraestruturas públicas e residências, esta dinâmica é completamente alterada, pois durante o período chuvoso, 30% do volume passa a ser evaporado pelas plantas - menos do que antes; 52% passa a escorrer em superfície- um aumento maior que o anterior, e apenas 15% passa a alimentar o lençol subterrâneo.

Diante disso, fica evidente que a expansão urbana, quando ocorre de forma acelerada e sem planejamento, acaba reduzindo drasticamente a capacidade de infiltração do solo, o que aumenta o volume de água escoando pela superfície. Esse tipo de urbanização interfere diretamente no ciclo hidrológico, transformando a chuva que antes se infiltrava no solo em escoamento superficial rápido. Dessa forma, eventos de precipitações elevados combinados às características físicas da bacia resultam em picos de vazão que ultrapassam a capacidade dos rios e canais, ampliando o risco de inundações.

2.2. Fragilidade Ambiental

Conforme Ross (1990) em "Geomorfologia: Ambiente e Planejamento", como tudo na natureza, bem como a sociedade, as formas do relevo podem ter maior ou menor grau de semelhança ao depender de sua gênese, idade e sobretudo os processos dinâmicos que atuam no presente ou que atuaram no passado e que são os responsáveis pela geração das formas atuais. Desse modo, as características ambientais presentes em nossa paisagem não podem ser entendidas de modo isolado, pois sua "esculturação" está diretamente relacionada ao meio que se insere e por consequência suas interações com demais aspectos físicos e sociais do espaço.

A sociedade ao fazer parte de um ecossistema, ela interage constantemente com os elementos naturais, utilizando seus recursos, transformando o espaço geográfico e gerando impactos ambientais. Ao reforçar o tema, a necessidade de compreender a ação antrópica como parte integrante dos processos naturais, e não como algo separado ou externo a eles é de extrema relevância para o estudo na geomorfologia. Essa degradação do ambiente não apenas transforma a paisagem original, suprindo suas características naturais fundamentais, mas também desafiam novos processos morfodinâmicos (Ross, 1990).

Para fundamentar sua análise, Ross (1990;1994) recorreu à abordagem proposta por Tricart (1977), que utilizou a Teoria Geral dos Sistemas¹, originalmente sistematizada por Bertalanffy (1968), para desenvolver o conceito de ecodinâmica. Segundo seu estudo, as ecodinâmicas podem gerar desequilíbrios temporários ou permanentes, afetando a relação entre pedogênese (formação e desenvolvimento dos solos) e morfogênese (modelagem do relevo).

Sendo classificada em três níveis, a estabilidade ambiental, nesse contexto, é definida pela sensibilidade do meio às mudanças com meios estáveis, meios de transição e meios instáveis. Os meios estáveis, definidos quando estão em equilíbrio dinâmico, são aqueles em que os processos pedogenéticos predominam em relação aos morfogenéticos. Nesse contexto, a formação e conservação dos solos são favorecidas, já que a cobertura vegetal bem desenvolvida reduz a intensidade dos processos erosivos e do escoamento superficial, ao mesmo tempo em que aumenta a infiltração da água no solo. Assim, a ação da morfogênese mecânica é minimizada, mantendo o ambiente em condições de relativa estabilidade (TRICART, 1977).

¹ A Teoria Geral dos Sistemas foi sistematizada por Bertalanffy (1968) no artigo General System Theory (Weilkiens,2007) cujo objetivo era compreender fenômenos complexos a partir da ideia de sistemas abertos, ou seja, conjuntos que trocam matéria, energia e informação com o meio externo.

Os meios de transição, por sua vez, ocorrem, simultaneamente, entre a morfogênese e a pedogênese, sendo que uma é mais expressiva, hora a outra, uma vez que depende de determinadas condições ambientais para agir. Já os meios instáveis, apresentam processos morfogenéticos que predominam em relação aos pedogenéticos. Tricart (1977) expõe sobretudo aqueles ambientes afetados pelo clima associados à eventos extremos, como as chuvas torrenciais e os deslizamentos de terras. Em condições assim, os ambientes são fortemente comprometidos a um ponto tão crítico que leva à irreversibilidade da condição em que se encontrava inicialmente, impossibilitando atividades de desenvolvimento e ocupação humana.

Em virtude dos processos e formas do relevo, Ross (1994; 1990) por sua vez desenvolveu uma proposta aplicada ao zoneamento ambiental, levando em conta tanto o impacto das ações humanas quanto o estado de conservação dos ambientes. Segundo a proposta do autor (*op cit*), a análise da fragilidade exige alguns estudos básicos, como a declividade, a geologia, o solo, a vegetação, precipitação e o uso e cobertura da terra, que devem ser analisados por meio de relatórios técnicos sintéticos e analisados de forma integrada. Com isso, o autor (*op cit*) classificou o resultado dessa combinação em diferentes níveis de fragilidade, organizando-as essencialmente em Unidades Ecodinâmicas Estáveis, De Transição e Instáveis, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Unidades Ecodinâmicas por Ross (1990)

Classificação	Características	Condicionantes
Unidades Ecodinâmicas Estáveis	Área Preservada com a Ecodinâmica em estado natural	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vegetação densa e sua cobertura atua na redução do impacto das chuvas e, consequentemente nos processos mecânicos da morfogênese; 2. Dissecção moderada do relevo, sem incisão violenta dos cursos d'água e vertentes de longa evolução; 3. Ausência de manifestações vulcânicas e abalos sísmicos que possam desencadear paroxismos morfodinâmicos de aspectos mais ou menos catastróficos.
Unidades Ecodinâmicas de Transição	São susceptíveis a fenômenos de amplificação da dinâmica natural	<ol style="list-style-type: none"> 1. Presença de cobertura vegetal parcial ou em processo de regeneração, com baixa capacidade de proteger o solo e regular o escoamento superficial; 2. Relevo moderadamente dissecado, com encostas ativas e áreas sujeitas a instabilidade, especialmente em períodos de chuvas intensas; 3. Solos medianamente desenvolvidos, com ocorrência de processos erosivos localizados e acúmulo de sedimentos em áreas de deposição.
Unidades Ecodinâmicas Instáveis	Morfogênese sendo o elemento da dinâmica natural. Ambientes naturais intensamente modificados pelo homem	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inexistência de cobertura vegetal densa e condições bioclimáticas agressivas, variações fortes e irregulares de chuva e ventos promovendo processos erosivos e comprometimento da qualidade das águas superficiais; 2. Relevo com vigorosa dissecção, apresentando declives fortes e intensos; 3. Presença de solos rasos ou constituídos por partículas com baixo grau de erosão; 4. Planícies e fundos de vales sujeitos a inundação.

Fonte: Adaptado de Ross, 1994 apud Pimentel (2019).

Dante da adequação das classificações, Ross (1994) definiu que as Unidades Ecodinâmicas tanto estáveis quanto instáveis possuem vários graus de instabilidade, variando desde o grau de instabilidade mais fraco até o grau de instabilidade mais forte. As ecodinâmicas de transição, por sua vez, caracterizam como áreas que são suscetíveis a fenômenos naturais por estarem em um ambiente de passagem gradual, sendo também importantes para a presença antrópica no território. Estes graus de instabilidade seriam emergentes nas Unidades Ecodinâmicas Instáveis e potenciais nas Unidades Ecodinâmicas

Estáveis, já que apesar do equilíbrio dinâmico existe sempre uma instabilidade previsível em razão das próprias características naturais e da possível alteração do meio pela sociedade humana.

A partir dessa abordagem, ele propôs a distinção entre dois tipos de fragilidade ambiental: a fragilidade potencial, que está presente mesmo em ambientes aparentemente estáveis e decorre de características naturais como relevo, solo e clima; e a fragilidade ambiental ou emergente, que se manifesta a partir da interferência humana acoplada as características naturais, visíveis nas realidades modernas no espaço.

Por meio desses indicadores, o estudo da fragilidade ambiental evidencia a importância da dinâmica natural e das interações entre os elementos que compõem o sistema ambiental. Ao mapear essa fragilidade, torna-se possível identificar as áreas mais sensíveis, que requerem maior atenção no uso e ocupação, pois o uso inadequado pode comprometer o equilíbrio de todo o sistema. Qualquer interferência nessa dinâmica afeta diretamente e indiretamente a integração entre os elementos da paisagem ou os próprios componentes do meio, resultando em alterações que podem repercutir no seu equilíbrio dinâmico.

2.3. Mudanças Climáticas e Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

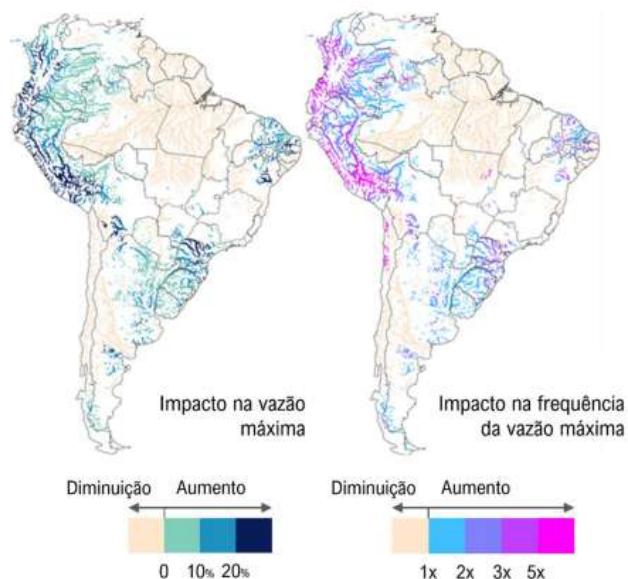
Segundo relatório do Copernicus (2025), citado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2025), o ano de 2024 marcou um ponto crítico no cenário climático global, ao registrar pela primeira vez um aumento de 1,5 °C na temperatura média do planeta em relação aos níveis pré-industriais. Esse aquecimento exerceu influência direta nos eventos extremos, como enchentes, secas, ondas de calor e incêndios florestais, ao alterar o equilíbrio do ciclo hidrológico do planeta. No Brasil, especificamente, esse cenário foi intensificado pela atuação do fenômeno El Niño², que embora seja uma variabilidade climática natural, entre os anos 2023 e 2024 apresentou intensidade classificada como moderada a forte (INMET, 2024), influenciando significativamente diferentes regiões da América do Sul.

Estudos recentes do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS em parceria com a ANA (Paiva et al., 2024a, b; 2025; Petry et al., 2025 apud ANA, 2025) projetam, que a América do Sul como Peru, Bolívia e o sul do Brasil – em especial o Rio Grande do Sul –

² El Niño é um fenômeno climático que ocorre no Oceano Pacífico. Durante esse período, ventos incomuns fazem com que as águas quentes da superfície do Equador se movam para o leste, em direção à América Central e do Sul. O El Niño pode causar mais chuva do que o normal na América do Sul e Central e nos Estados Unidos. (Disponível em: [el-nino/](#))

serão as regiões mais afetadas pelo aumento de cheias devido às mudanças climáticas (**Figura 6**). A combinação entre maior frequência de eventos extremos como as chuvas recordes de 2024 e projeções hidrológicas (PAIVA et al, 2024 apud ANA, 2025) indica que a ocorrência de inundações pode quintuplicar nas próximas décadas, elevando a vulnerabilidade da região a desastres hidrogeológico.

Figura 6: Alteração de cheias severas em rios médios e grandes no Brasil e na América do Sul



Fonte: Paiva et al. (2025), Petry et al. (2025) *apud* ANA (2025)

Esse cenário está diretamente relacionado ao avanço das atividades humanas — como a expansão urbana, o desmatamento e a emissão crescente de gases de efeito estufa — que, segundo o 4º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (DE CONINCK, 2018), essas ações tornam os eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes e intensos. Nesse sentido, as projeções de Paiva et al. (2024) revelam que, diante de um cenário de mudanças climáticas com origem predominantemente antrópica, é necessário aprimorar a compreensão dos fenômenos e subsidiar estratégias de adaptação mais coerentes com as realidades locais.

Embora no âmbito do estudo da geografia o conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) seja pouco estudado, sua contribuição ao debate climático fornece subsídio para introduzir abordagens inovadoras e sustentáveis para a gestão de riscos de inundações e enchentes. Com foco na adaptação a eventos climáticos extremos, as SbN são definidas como

ações voltadas à conservação, manejo e restauração de ecossistemas naturais que proveem benefícios ambientais, sociais e econômicos (UNEP; IUCN, 2021 apud HORN, 2024). Essas estratégias se destacam por sua eficácia na redução de riscos de desastres, ao promoverem a resiliência dos territórios frente a fenômenos como chuvas intensas e inundações, superando a lógica tradicional baseada exclusivamente em infraestrutura convencional.

O conceito ganhou destaque mundial em 2009, quando a *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) o mencionou em um documento de posicionamento para a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima na Conferência das Partes (UNFCCC). Dez anos mais tarde, a Avaliação Global da Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos, realizada pela Plataforma Intergovernamental Científica e Política sobre a Biodiversidade e os Serviços Ecossistêmicos (IPBES), estimou que as SbN, podem fornecer 37% da mitigação das mudanças climáticas, sendo soluções custo-efetivas para o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) urbanos (MARQUES, 2021). Durante a COP14 de 2019, Marques (2021) cita que no evento foi relatado que:

“É necessário promover o investimento no desenvolvimento e uso de SbN para enfrentar os desafios sociais, inclusive por meio da restauração de ecossistemas e da reabilitação de sistemas agrícolas, adaptação e mitigação e abordagens baseadas em ecossistemas para redução de risco de desastres.” (MARQUES, 2021, pg. 21).

Estudos realizados por Oliveira (2023) mencionam que, no Brasil e em diversas cidades ocidentais, os mecanismos de estruturas tradicionais de drenagem de águas pluviais - sarjetas e galerias subterrâneas - são os mais utilizados (OLIVEIRA, 2023). Entretanto, embora essas técnicas funcionem até certo ponto, elas não acompanham os novos padrões de precipitação e as demandas impostas pelas mudanças climáticas. Assim, ao considerar medidas de conservação de ecossistemas naturais, as SbN podem ser integradas às tais soluções tradicionais, contribuindo para melhorias nas cidades (OLIVEIRA, 2023). Tal caso pode ser observado na **Figura 7**, que mostra o diagrama de permeabilização das superfícies.

Figura 7: Diagrama conceitual ilustrando superfícies impermeáveis e permeáveis.



Fonte: Chesapeake and Atlantic Coastal Bays Trust Fund, 2013 apud Adaptation Clearinghouse do Georgetown Climate Center apud Oliveira (2023)

Seguindo com a discussão de Oliveira (2023), a autora discorre sobre os conceitos de infraestruturas cinzas e infraestruturas verdes, como mostrado na figura acima. A primeira se caracteriza por construções feitas com materiais como concreto e outros instrumentos de engenharia tradicionais com o intuito de mediar a interação entre sistemas humanos e sistemas naturais atmosféricos (Oliveira, 2023). Esse sistema de infraestrutura acarreta o aumento da superfície impermeável, isto é, áreas onde não ocorre a infiltração da água no solo em razão especialmente do crescimento urbano, quando submetidos a eventos extremos como inundações, podem vir a falhar.

Já a infraestrutura verde, Oliveira (2023) busca discorrer baseando-se em autores que adotam outros conceitos em cidades que beneficiam toda a escala espacial por meio da integração entre planejamento e desenvolvimento territorial. Nesta abordagem, busca-se o incremento de superfície mais permeável que promova maior resiliência das cidades a eventos de grande precipitação, por exemplo. Segundo Herzog (2013), citado por Oliveira (2023), a estrutura física sendo ela tradicional (infraestrutura cinza) que conecta os sistemas verdes podem proporcionar diversos benefícios, como: prevenção de enchentes e deslizamentos, redução das emissões de gases de efeito estufa, amenização das ilhas de calor, aumento da biodiversidade nativa, promoção da agricultura urbana e educação ambiental.

Neste sentido, as SbN bebem nesta infraestrutura ao passo de integrar no ambiente o Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), uma nomenclatura norte-americana designada a

uma filosofia de design que se perpetuou ao redor do mundo, com objetivo de promover uma gestão integrada das águas pluviais, a partir de práticas econômicas e viáveis, atuando complementarmente aos sistemas tradicionais de drenagem. (GUTIERRES e RAMOS, 2019 apud OLIVEIRA, 2023). As medidas LID são estratégias para gerir água da chuva e buscam reproduzir processos de infiltração, armazenamento, evaporação e transpiração da água, com foco em integrar recursos naturais no planejamento urbano. Por sua vez, surgem para promover o alcance de objetivos para adaptações climáticas e promoção de ecossistemas sustentáveis sem necessariamente realocar populações de suas casas ou induzir novas engenharias para conter cenários de desastres socioambientais como o caso de enchentes.

O artigo “*Nature-Based Solutions for Flood Mitigation: The Case Study of Kochi*”, de Aloscious (2025), apresenta um exemplo relevante da aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) no contexto urbano. O estudo propõe a transformação da cidade de Kochi em uma “esponja urbana”, capaz de absorver e regular o escoamento de águas pluviais por meio da conservação, gestão e restauração de ecossistemas naturais e modificados. Entre as estratégias destacam-se a restauração de várzeas naturais, o aumento da capacidade de canais, a criação de florestas urbanas e a implementação de infraestruturas verdes, como pavimentos permeáveis e sistemas de captação de água da chuva como também citado por Oliveira (2023).

O artigo também propõe intervenções específicas, como o rejuvenescimento de canais por meio da inserção de zonas úmidas construídas, a instalação de jardins de chuva, áreas de biorretenção e margens vegetadas (“margens vivas”). Além disso, são sugeridos espaços verdes urbanos em pequena escala, como parques de bolso, e o desenvolvimento de infraestrutura verde inteligente, incluindo sistemas de coleta de água pluvial e “ruas verdes”. Tais medidas visam integrar a dinâmica natural ao ambiente urbano, promovendo maior resiliência hidrológica e contribuindo para a mitigação dos impactos causados por inundações.

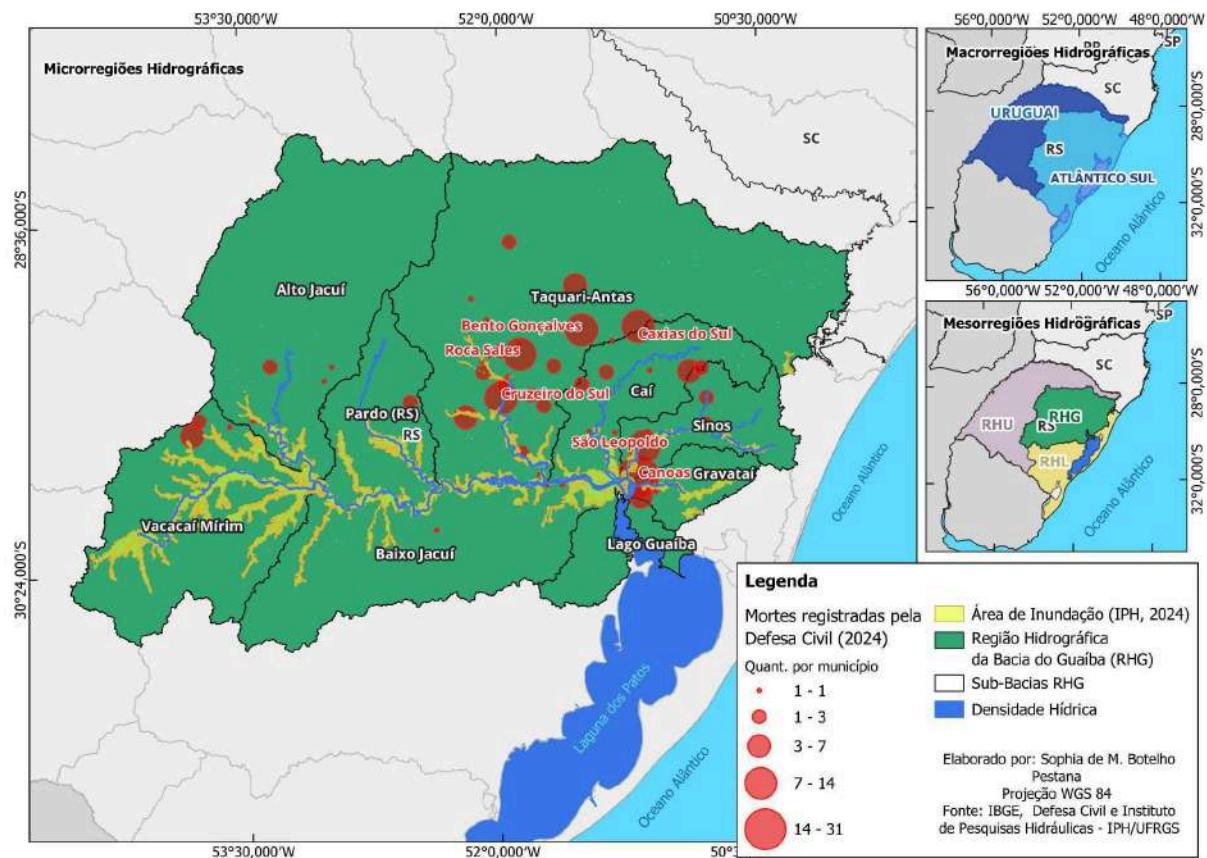
Para que as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) alcancem seu pleno potencial como estratégia de adaptação climática, é fundamental adotá-las em uma abordagem integrada em escala de paisagem (HORN, 2024). Isso implica proteger, restaurar e manejar ecossistemas em contextos urbanos, rurais, costeiros e marinhos de forma articulada. A conectividade e a integridade ecológica são elementos essenciais não apenas para a conservação da biodiversidade, mas também para a própria resiliência das SbN frente a impactos climáticos

futuros. Dessa maneira, investir em SbN de forma sistêmica contribui significativamente para a redução dos riscos climáticos, promovendo segurança ambiental, bem-estar social e estabilidade econômica em médio e longo prazo.

3. ÁREA DE ESTUDO

Embora o desastre socioambiental de maio de 2024 no Rio Grande do Sul tenha impactado todo o estado, hoje, das 183 mortes divulgadas pela Defesa Civil do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 2024), todas se encontram na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG). Destacadas na **Figura 8**, a região combinada pelas duas principais bacias hidrográficas do estado - Rio Uruguay e Lagoa dos Patos - é um dos recortes mais importantes para se analisar o evento de 2024.

Figura 8: Mapa de localização da área de estudo no recorte temporal das enchentes de maio de 2024 no Rio Grande do Sul.



Elaborado pela Autora (2025)

Localizada na porção centro-leste do Rio Grande do Sul, a região hidrográfica abrange uma área de aproximadamente 8.485.133,7 hectares, representando cerca de um terço do território estadual. Abriga mais de 60% da população gaúcha e concentra pelo menos 70% do PIB do estado (UFRGS, 2024). Além disso, a área se situa em uma zona de transição entre os biomas Mata Atlântica e Pampa, conferindo-lhe uma notável diversidade paisagística.

A RHG está localizada predominantemente na macrorregião do Atlântico Sul, fazendo limite com outras mesorregiões hidrográficas, como a Bacia do Rio Uruguai (RHU) e as Bacias Litorâneas (RHL). Essa posição geográfica estratégica faz com que a RHG seja adotada como uma unidade de análise relevante, pois funciona como um sistema geográfico fechado, no qual todos os processos naturais estão interligados. Nesse sistema, a dinâmica hídrica e morfológica – incluindo o escoamento dos rios, a erosão e a sedimentação – interagem de maneira interdependente, definindo o comportamento da bacia como um todo.

Em função dessas características, a hidrodinâmica da RHG apresenta elevada complexidade, com diversos rios convergindo para o Rio Jacuí, o qual escoa suas águas para a Lagoa dos Patos e, posteriormente, para o Oceano Atlântico. Essa característica ficou evidente em cenários de desastres socioambientais, como o ocorrido em maio de 2024, refletindo-se nos dados do IPH/UFRGS (2024) incorporados na **Figura 8**, que mostram que embora a porção inferior da bacia concentre as áreas mais críticas de inundação, os impactos se propagam de forma sistêmica, atingindo inclusive regiões elevadas. Essa interdependência hidrológica demanda uma abordagem integrada que considere tanto as dinâmicas naturais (como padrões de escoamento e características geomorfológicas) quanto os fatores antrópicos (como uso e ocupação do solo), os quais serão examinados em profundidade nos próximos capítulos.

3.1. Aspectos Físicos

Em sua obra Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas (2003), Ab'Saber afirma:

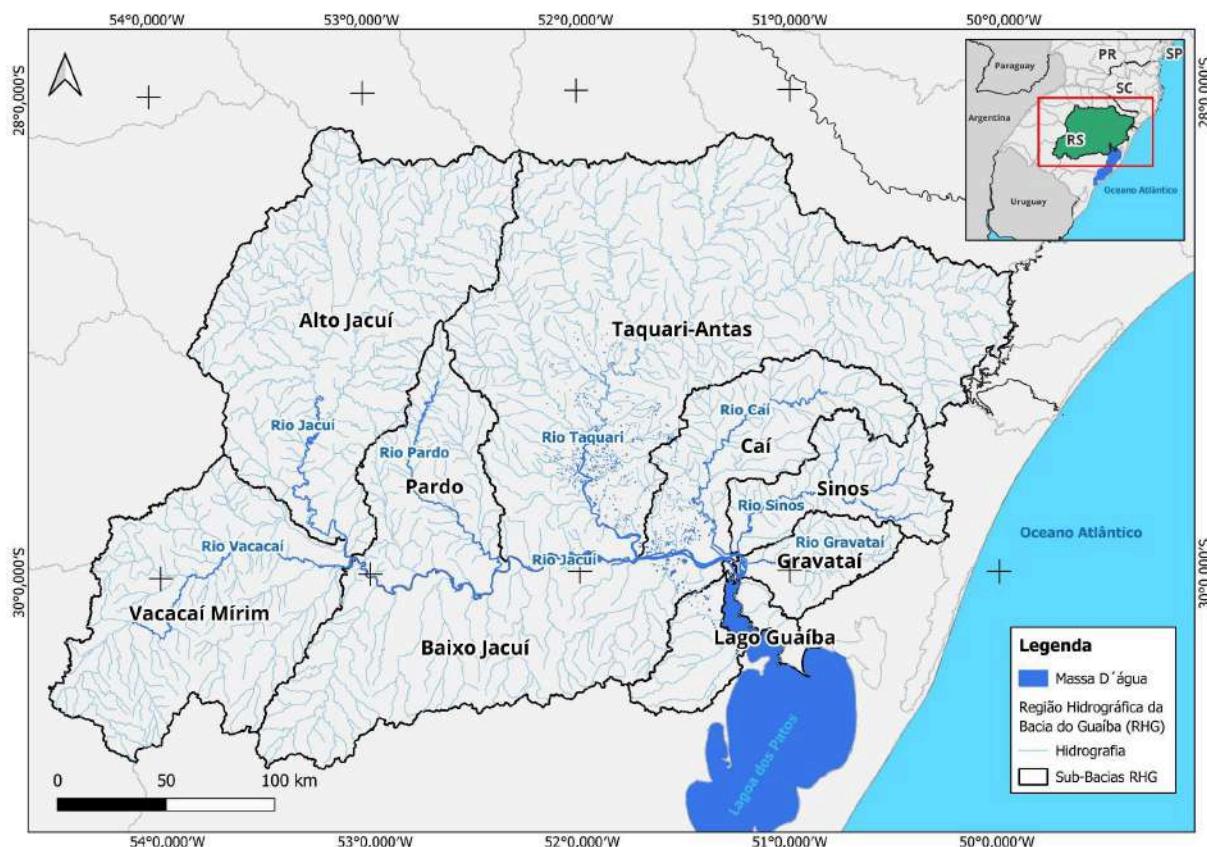
“A paisagem é sempre uma herança. Na verdade, ela é uma herança em todo o sentido da palavra: herança de processos fisiográficos e biológicos, e patrimônio coletivo dos povos que historicamente a herdaram como território de atuação de suas comunidades.” (Ab'Saber, 2003, pg. 9)

Essa perspectiva reforça que a paisagem não deve ser vista apenas como um cenário natural, mas como o resultado das interações entre processos naturais e a ação humana ao longo do tempo. Ab'Sáber observa que os processos responsáveis pela compartimentação da topografia ocorreram ao longo de milhões de anos, enquanto os agentes que atualmente remodelam a paisagem são mais recentes. No campo da geografia, a análise integrada de elementos naturais — como relevo, clima, solos, vegetação e hidrografia — juntamente com as transformações humanas sobre esses componentes, permite compreender a formação e o uso dos diferentes espaços. Nesse sentido, conhecer as limitações específicas de cada tipo de paisagem é fundamental não apenas para descrevê-la, mas para interpretá-la como uma síntese dinâmica de processos físicos e sociais.

3.1.1. Hidrografia

A Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) é composta por nove microrregiões hidrográficas interligadas: Alto Jacuí, Pardo, Vacacaí Mirim, Baixo Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos, Gravataí e Lago Guaíba. Essa configuração permite que todos os principais afluentes convergem para o Rio Jacuí - rio principal da região (**Figura 9**).

Figura 9: Mapa de Hidrografia na RHG



Elaborado pela Autora (2025)

Esse comportamento pode ser evidenciado pelos estudos de Wilhelm e Weiss (2024). As autoras discorrem sobre os caminhos do rio Jacuí, uma vez que tem suas nascentes nos municípios de Passo Fundo e Marau, na sub-bacia do Alto Jacuí. Em seu percurso, ele recebe contribuições de importantes afluentes, como o rio Vacacaí e o Vacacaí Mirim, que integram a bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim e deságuam no Jacuí próximo ao limite entre a Restinga Seca e o rio. Já o rio Pardo, principal curso d'água na bacia hidrográfica do Pardo, encontra-se com o Jacuí no município de Rio Pardo, nome em homenagem a seu afluente principal.

Em seguida, na sub-bacia de Taquari-Antas, o rio Taquari deságua no rio Jacuí, com suas margens caracterizadas pelo desenvolvimento urbano dos municípios de Triunfo e São Jerônimo. Os rios Caí, Sinos e Gravataí despontam como os principais recursos hídricos em suas respectivas bacias hidrográficas, desaguando no Rio Jacuí ao atingir a região metropolitana e o município de Porto Alegre. Nesse ponto, o Rio Jacuí conecta-se ao Lago Guaíba, o qual deságua na Lagoa dos Patos formando o estuário conhecido como Rio Guaíba.

Nesse ponto de confluência, por sua vez, a bacia do Lago Guaíba destaca-se por abrigar extensas áreas de concentração industrial e urbana, sendo a região mais densamente habitada do Estado. Além disso, é o centro de uma diversidade de atividades, englobando setores agrícolas e pecuários, bem como atividades agroindustriais, industriais, comerciais e de serviços (WILHELM e WEISS, 2024). Diante desse panorama, torna-se evidente a importância do rio para a população gaúcha, diretamente e indiretamente, e para a economia e os serviços ecossistêmicos do estado.

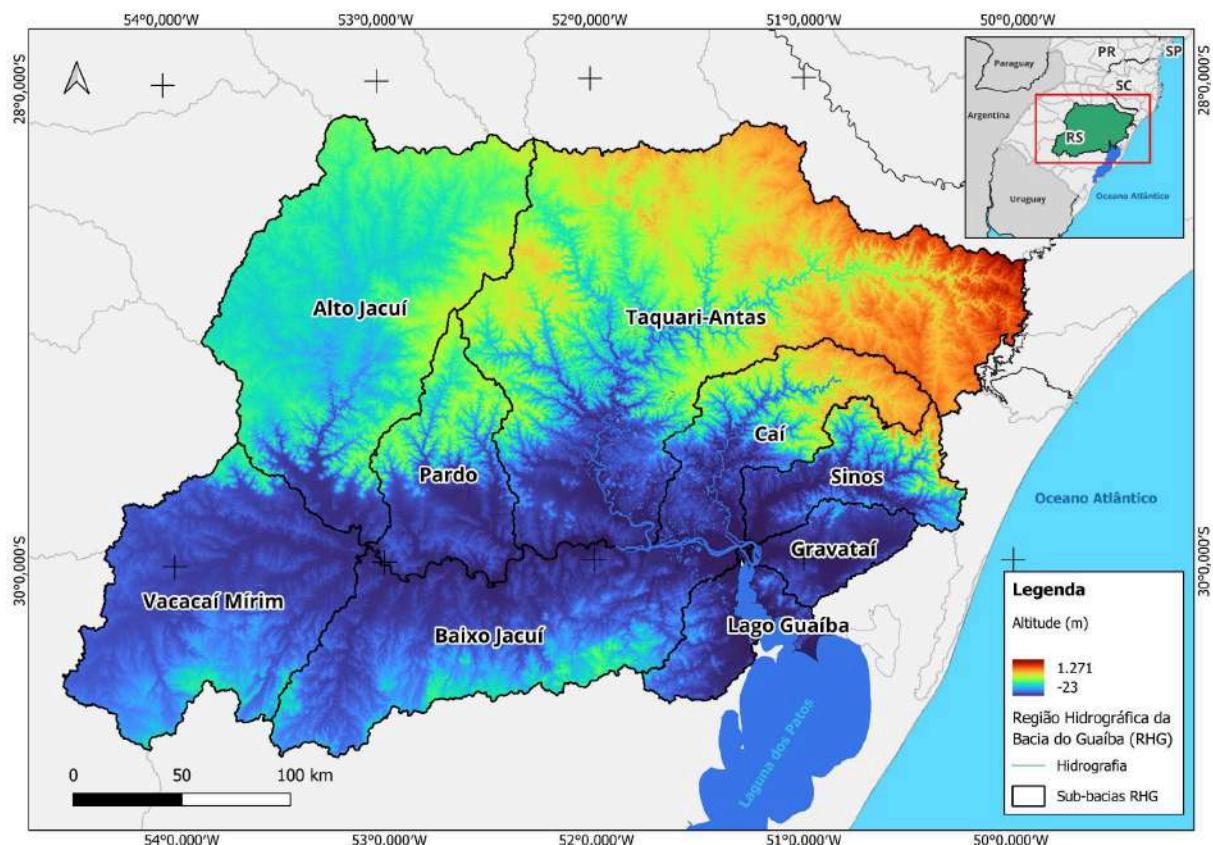
3.1.2. Relevo

Na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG), essa influência apresenta um relevo contrastante, com variações significativas de altitude, composição litológica e história geológica, aspectos que condicionam tanto o escoamento superficial quanto os processos erosivos e deposicionais.

3.1.2.1. Altimetria

A carta altimétrica (**Figura 11**), baseada em dados SRTM de 30 m de resolução, evidencia um claro gradiente de altitude na RHG, com cotas que variam de -23 a 1.271 metros. As áreas mais elevadas (em tons alaranjados e vermelhos) concentram-se no norte e nordeste, correspondendo às sub-bacias de Taquari-Antas, Cai, Pardo e parte do Alto Jacuí, importantes áreas de cabeceira e recarga hídrica.

Figura 10: Carta Altimétrica na RHG



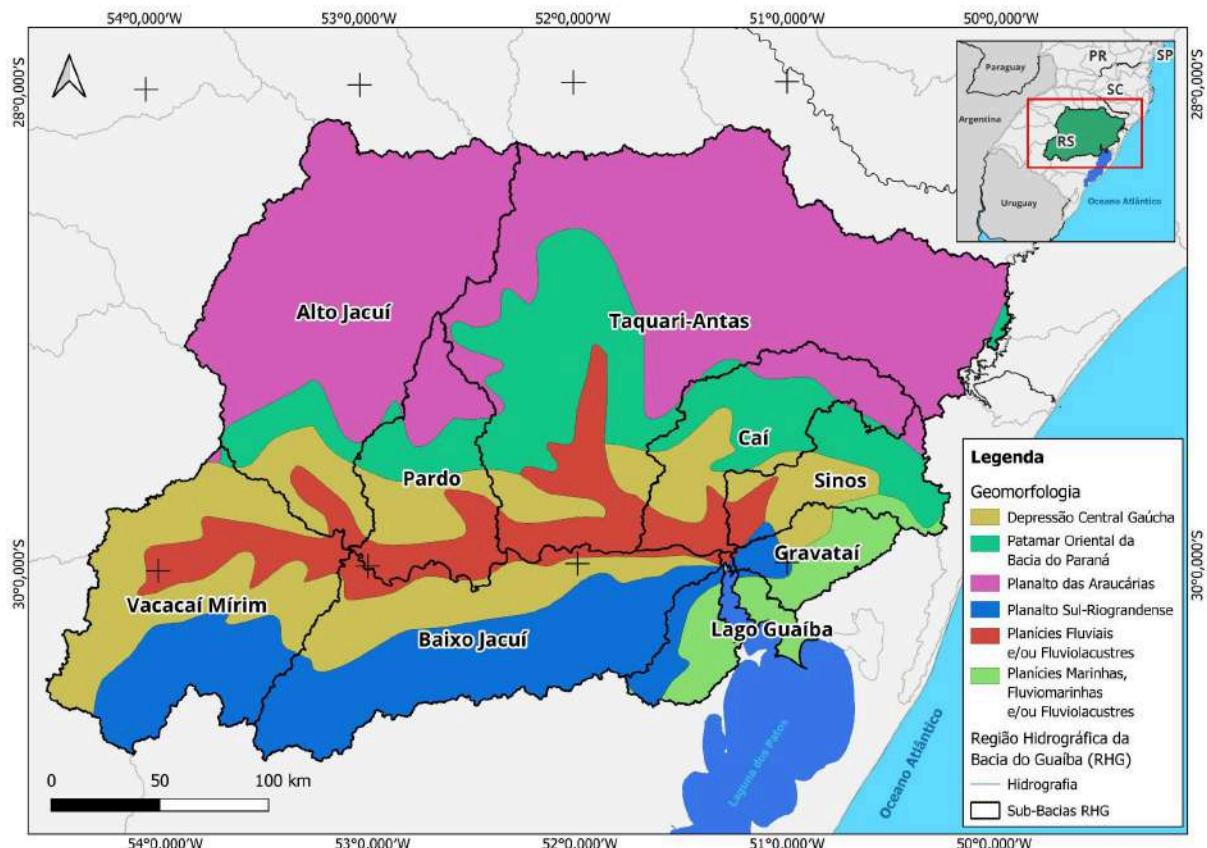
Fonte: OpenTopography DEM Downloader. Elaborado pela Autora (2025)

À medida que se avança para o sul e sudeste, observa-se uma progressiva redução da altitude (em tons azulados), com predominância de terrenos planos ou suavemente ondulados. Estas regiões mais baixas, como Baixo Jacuí, Gravataí, Sinos e o entorno do Lago Guaíba, são mais suscetíveis à inundação e à formação de áreas alagáveis, ao passo que caracterizam áreas de várzeas e de deposição sedimentar.

3.1.2.2. Unidades Geomorfológicas

De acordo com a classificação geomorfológica (**Figura 11**), a RHG apresenta uma estrutura diversificada, composta majoritariamente por três unidades principais: Planaltos, Depressões e Planícies.

Figura 11: Mapa das Unidades Geomorfológicas na RHG



Fonte: IBGE. Elaborado pela Autora (2025)

Complementando a análise anterior, as unidades de maior altitude da RHG incluem o Planalto das Araucárias (rosa forte) e o Patamar Oriental da Bacia do Paraná (ciano), que abrangem as sub-bacias do Taquari-Antas, Alto Jacuí, Caí, Sinos e Pardo. Essas áreas, localizadas nas porções mais elevadas, atuam como zonas de recarga hídrica, sendo fundamentais para a gênese e o direcionamento dos fluxos superficiais.

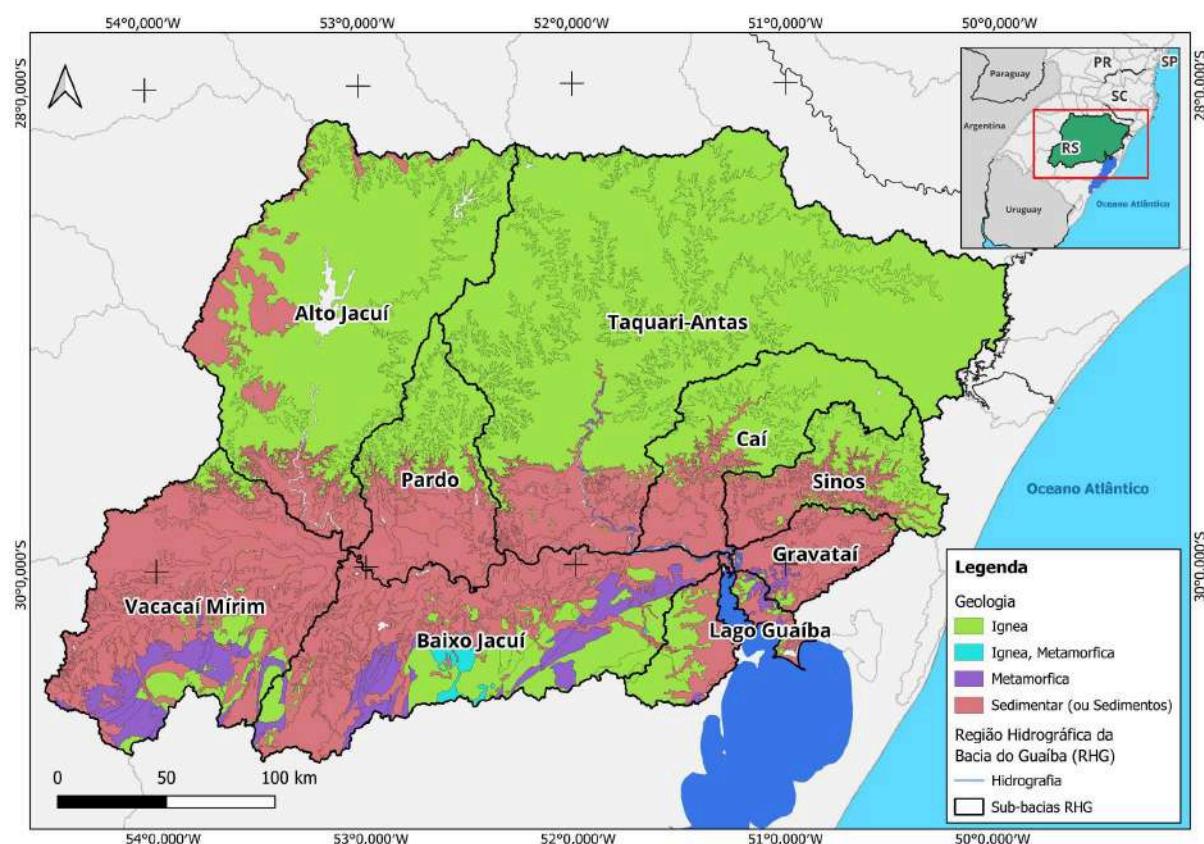
Já as unidades de média e baixa altitude, como partes da Depressão Central Gaúcha (laranja terroso) e as Planícies Fluviais (vermelho), localizadas no setor central da região, exercem um papel de acumulação hídrica. Essa compartimentação morfológica influencia diretamente a dinâmica dos fluxos, uma vez que essas áreas recebem as águas provenientes das cabeceiras e, devido à sua baixa declividade, favorecem o acúmulo e o fluxo dos escoamentos.

Diferentemente das unidades anteriormente mencionadas, outras áreas de transição em baixa altitude incluem o Planalto Sul-Riograndense (azul) e as Planícies Marinhais (verde claro). Essas regiões também recebem parte dos fluxos provenientes das zonas mais elevadas; no entanto, não atuam como áreas diretamente receptoras, uma vez que se encontram mais distantes das cabeceiras e dos principais pontos de recarga hídrica. Seu papel está mais relacionado à condução e ao escoamento final das águas, funcionando como zonas intermediárias no sistema hidrológico.

3.1.2.3. Unidades Geológicas

A análise geológica da RHG observada na **Figura 12** revela uma predominância de formações ígneas (em verde clara), presente em toda região hidrográfica, que recobre grande parte da porção norte e em menor quantidade na porção sul da bacia. Essas formações, compostas principalmente por quartzo e feldspato, são constituídas por rochas mais resistentes ao intemperismo químico e físico, apresentando, portanto, menor grau de fragilidade à erosão.

Figura 12: Mapa das Unidades Geológicas na RHG



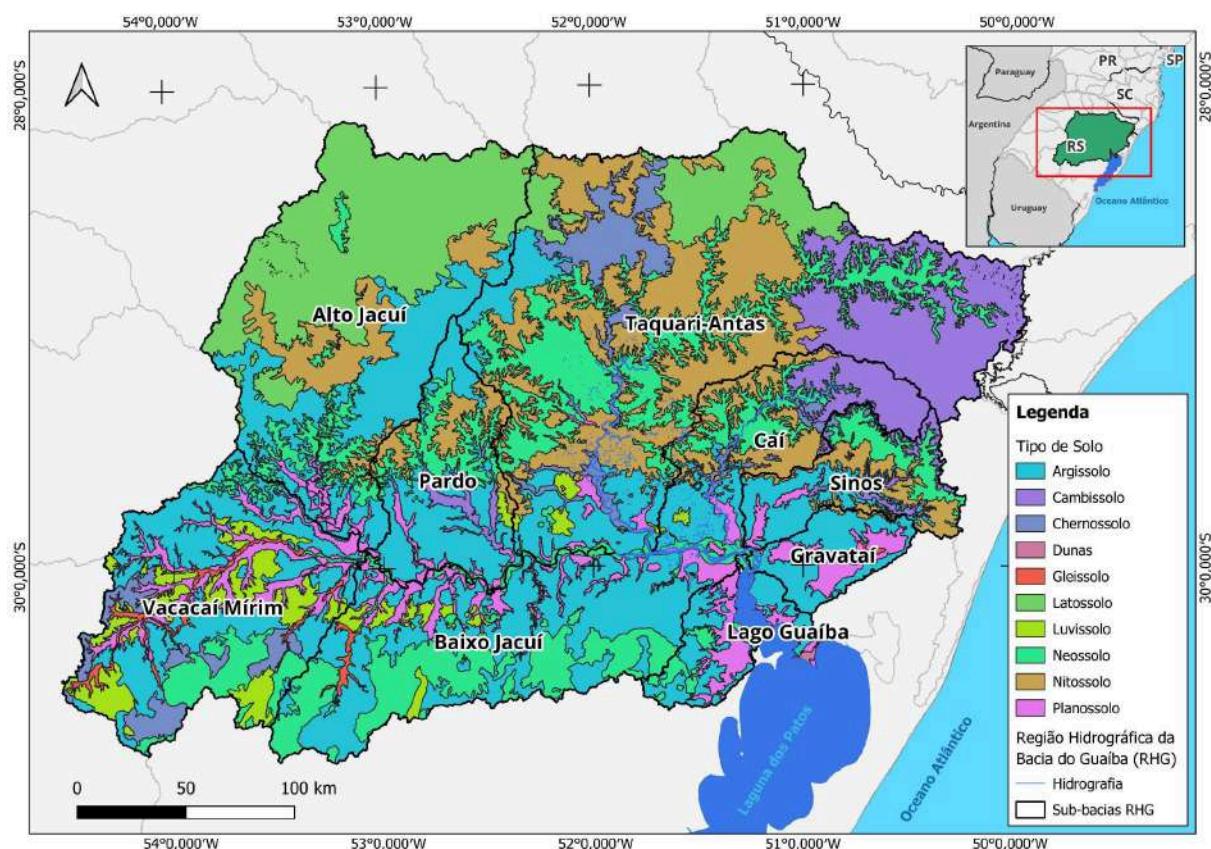
Fonte: IBGE. Elaborado pela Autora (2025)

Isso significa que, em comparação com unidades sedimentares (vermelho claro) ou metamórficas (roxas), os maciços ígneos tendem a manter o relevo mais elevado e estável ao longo do tempo, funcionando muitas vezes como áreas de cabeceira e divisores de drenagem. Ainda assim, quando submetidos a uma elevada intensidade das chuvas, esses litotipos podem se tornar pontos de fragilidade local, favorecendo processos erosivos mais intensos e a concentração da drenagem superficial.

3.1.3. Pedologia

Sob a perspectiva pedológica, a RHG caracteriza-se por uma complexa associação de classes de solos. Segundo Guerra et. al. (2014), os solos no Rio Grande do Sul são influenciados por processos que atuaram, e continuam atuando, influenciados por fatores ambientais, como material de origem do solo, clima, relevo, bem como o tempo de atuação desses fatores. De acordo com o **Figura 13**, é possível observar como essa distribuição se encontra na região.

Figura 13: Mapa da Pedologia na RHG



Fonte: IBGE. Elaborado pela Autora (2025)

Considerando a diversidade de classes de solos e suas distintas localizações dentro da Região Hidrográfica do Guaíba (RHG), foi possível organizar essas informações na Tabela 2. Nela, apresentam-se as classes de solos identificadas, suas respectivas descrições conforme Guerra et al. (2014) e a distribuição espacial de cada uma no contexto da RHG.

Tabela 2: Distribuição e Caracterização das Classes de Solos na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG)

Classe	Descrição (Guerra et. al. pg. 94 - 98)	Sub-bacias presentes
ARGISSOLO	Solos profundos, variando de bem drenados e imperfeitamente drenados em relevos suaves ondulados a fortemente ondulados, ocupando a maior parte do território gaúcho. Por serem pobres em fertilidade, exigem altos investimentos em corretivos, fertilizantes e sistemas de manejo para alcançar rendimentos satisfatórios. São solos suscetíveis à erosão e degradação.	Alto Jacuí Baixo Jacuí Caí Gravataí Guaíba Pardo (RS) Sinos Taquari/Antas Vacacaí
CAMBISSOLO	São rasos profundos, bem drenados a imperfeitamente drenados, dependendo da posição que ocupam no relevo. Possuem aptidão para fruticultura, silvicultura e pastagens.	Caí Pardo (RS) Sinos Taquari/Antas
CHERNOSSOLO	Quando localizados em relevo plano a suavemente ondulados, nas várzeas dos rios, apresentam alto potencial para culturas anuais, entretanto têm risco de inundação ocasional.	Caí Sinos Taquari/Antas Vacacaí
GLEISSOLO	Ocorrem em depressões mal drenadas em todos o estado, nas várzeas de rios e planícies lagunares. São aptos para cultivo de arroz irrigado e, quando drenados, podem ser cultivados com culturas anuais como milhos, soja e feijão.	Baixo Jacuí Gravataí Sinos Vacacaí
LATOSSOLO	Solos profundos a muito profundos, bem drenados e com perfil entre os horizontes homogêneos. São bem intemperizados com condições de relevo suave ondulado e com alta aptidão agrícola.	Alto Jacuí Taquari/Antas
LUVISSOLO	Solos pouco profundos, bem a imperfeitamente drenados. Por serem originados por diferentes tipos de minerais, eles se comportam diferentes para cada substrato.	Baixo Jacuí Caí Pardo (RS) Taquari/Antas

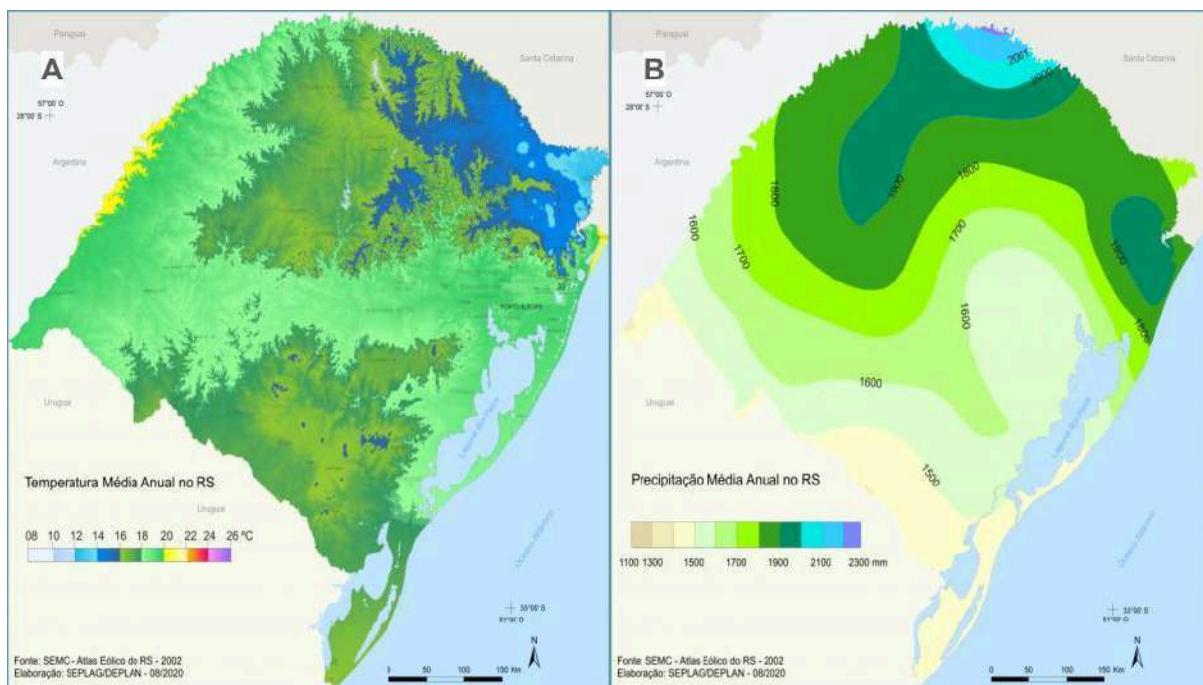
		Vacacaí
NEOSSOLO	São poucos desenvolvidos e normalmente rasos, de formação muito recente, desenvolvidos a partir dos mais diversos tipos de rochas e encontrados nas mais diversas condições de relevo e drenagem. Nas áreas com declividade entre 15%-25% podem ser usados para pastagem, com 25%-45% devem ser usados com reflorestamento ou com fruticultura intercaladas com plantas de cobertura e recuperadoras de solo. Acima de 45% são consideradas pela legislação ambiental como Áreas de Preservação Permanente.	Alto Jacuí Baixo Jacuí Caí Gravataí Guaíba Pardo (RS) Sinos Taquari/Antas Vacacaí
NITOSOLO	Em função da profundidade, boa drenagem, da porosidade, da estrutura e de condições do relevo, possui boa aptidão agrícola para culturas anuais, desde que seja corrigida a fertilidade química.	Alto Jacuí Caí Gravataí Pardo (RS) Sinos Taquari/Antas
PLANOSSOLO	São mal drenados, localizados em áreas de várzea, com relevo plano e suave ondulado. Normalmente aparecem nas margens dos rios e lagoas, como nas regiões centro-ocidental e oriental rio-grandense, bem como planícies costeiras.	Alto Jacuí Baixo Jacuí Caí Gravataí Guaíba Pardo (RS) Sinos Taquari/Antas Vacacaí

Fonte: Guerra et. al 2014. Adaptado pela Autora (2025)

3.1.4. Clima

O clima do Rio Grande do Sul é classificado como temperado do tipo subtropical, influenciado por sua posição latitudinal, a qual favorece a alternância de massas de ar provenientes tanto da região polar quanto das áreas tropicais, de origem continental e atlântica (RIO GRANDE DO SUL, 2024). Com base na **Figura 14**, elaborada a partir do Atlas Geográfico do RS (2002) pela Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão (SEPLAG), é possível visualizar de forma sintética as principais características climáticas do estado.

Figura 14: Distribuição Espacial da Temperatura e Precipitação Médias Anuais no Rio Grande do Sul



Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul - 2002 (RIO GRANDE DO SUL, 2024)

No que se refere às temperaturas (**Figura 14 - a**), o estado apresenta ampla variação sazonal, com verões quentes e invernos rigorosos. As temperaturas médias anuais variam entre 12 °C e 20 °C, com registros mínimos em torno de 8 °C e máximas que podem atingir até 28 °C, conforme os gradientes altitudinais e a dinâmica das massas de ar. Em relação à precipitação média anual (**Figura 14 - b**), varia entre 1.300 e 1.600 mm no setor sul do estado, e entre 1.600 e 1.900 mm nas regiões ao norte. As maiores concentrações de chuva ocorrem no nordeste do estado, especialmente nas encostas do Planalto Meridional, onde os índices ultrapassam 2.000 mm anuais. Por sua vez, a Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) se insere em uma área caracterizada por precipitação média anual entre 1.600 mm e 1.900 mm com temperaturas médias anuais do ar na região variando entre 10 °C e 22 °C, refletindo as influências climáticas típicas do sul do Brasil.

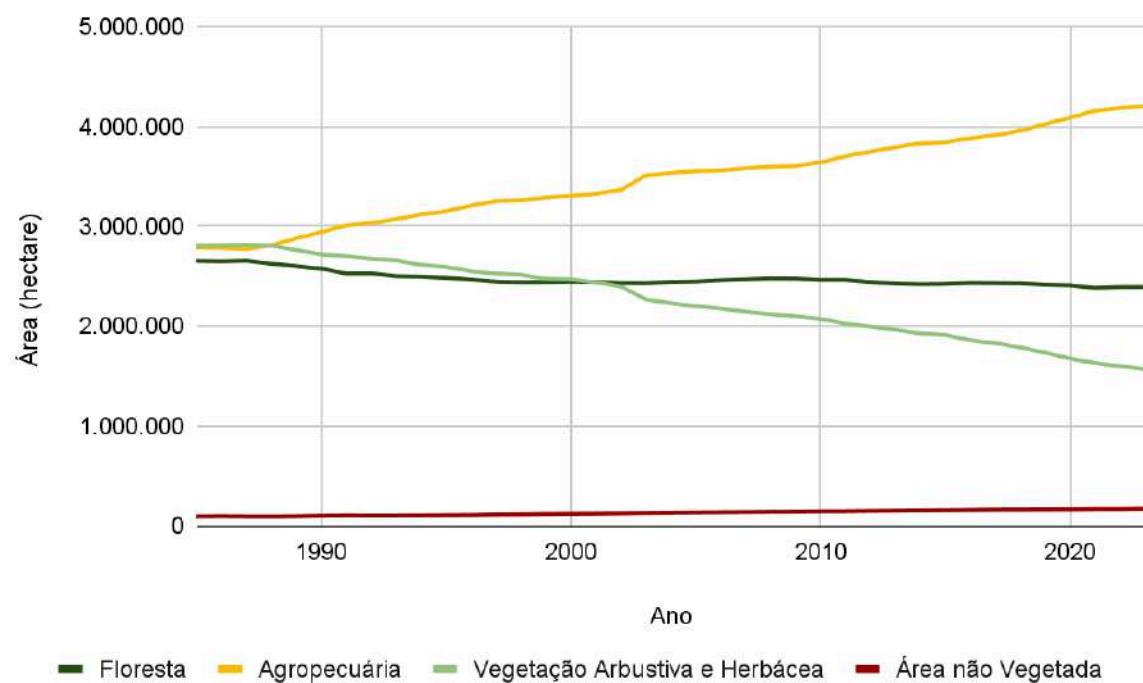
3.2. Aspectos de Uso e Ocupação

A transformação do uso e cobertura da terra no Rio Grande do Sul reflete processos históricos de ocupação que remontam ao período colonial, intensificados ao longo dos séculos XIX e XX com a expansão da fronteira agrícola e a consolidação das atividades pecuárias. Segundo Guerra et. al. (2014), a partir da segunda metade do século XX, impulsionado com investimentos em infraestrutura e incentivos à expansão da agroindústria, o território gaúcho passou a sofrer uma profunda reorganização espacial ao substituir sua

paisagem natural por cultivos agrícolas, silvicultura comercial e ocupações urbanas, promovendo um crescente aumento da paisagem.

No contexto específico da Região Hidrográfica do Guaíba (RHG), de acordo com a Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão (SEPLAG), a região apresenta áreas de grande concentração industrial e urbana, além de sediar o maior número de atividades agrícolas, pecuárias, industriais e de serviços. Nesse contexto, por exemplo, ao observar o gráfico 1, entre 1985 e 2023, verificou-se um avanço expressivo das áreas destinadas à agropecuária e áreas não vegetadas, paralelo a uma diminuição contínua de florestas e vegetação arbustiva e herbácea (MAPBIOMAS, col. 9).

Gráfico 1: Distribuição das classes de uso e ocupação do solo na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023

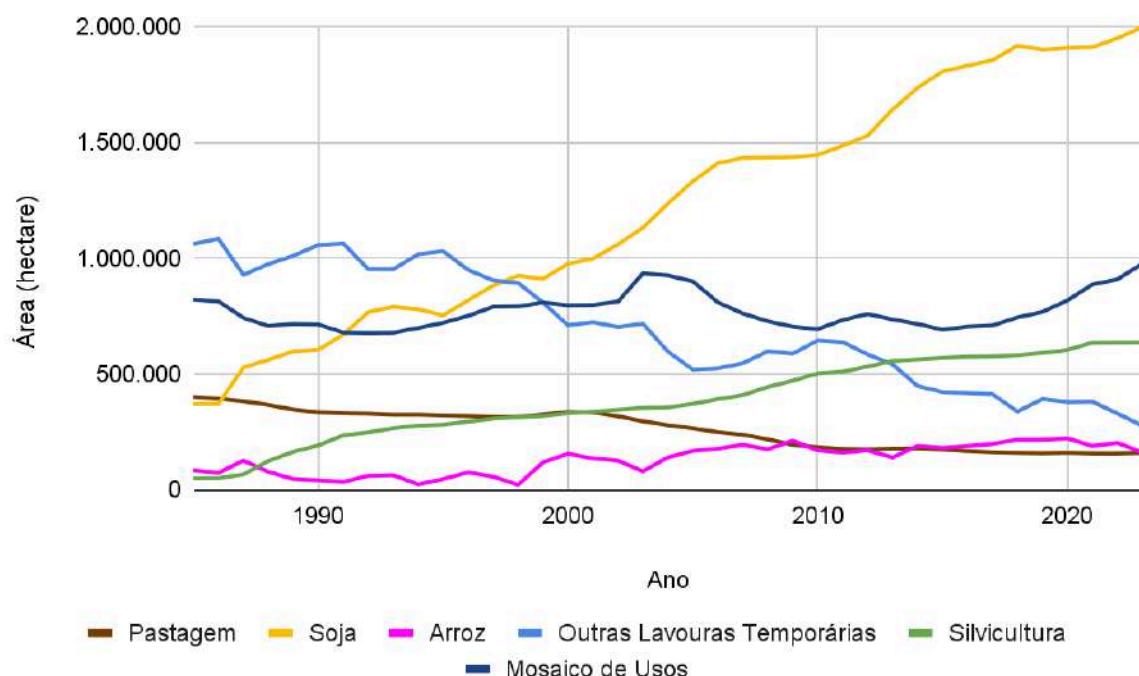


Fonte: MapBiomass, coleção 9. Elaborado por Autora (2025)

O aumento da agropecuária na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) é notório e está diretamente relacionado às dinâmicas econômicas do estado. Em 2021, segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2024) o Valor Adicionado Bruto (VAB) da agropecuária brasileira alcançou R\$ 591,0 bilhões, dos quais o Rio Grande do Sul foi responsável por aproximadamente 12,7% — cerca de R\$ 75,0 bilhões.

Como observado no gráfico 2, a soja na RHG se destaca em valores de produção por hectare em cerca de 440% ao longo das décadas. Em relação ao arroz, embora o crescimento tenha sido de 91%, o estado se destaca como o maior produtor nacional de arroz em casca (SEPLAG, 2022). Outro setor em expansão é a silvicultura, que registrou um aumento de quase 1200% na produção. Em contrapartida, outras classes de uso da terra, como lavouras temporárias diversas e áreas de pastagem, apresentaram queda significativa ao longo das últimas décadas, com reduções de 74% e 60%, respectivamente. Esses dados indicam uma reorganização do uso do solo, impulsionada pelas dinâmicas econômicas e pela especialização de monoculturas no território gaúcho.

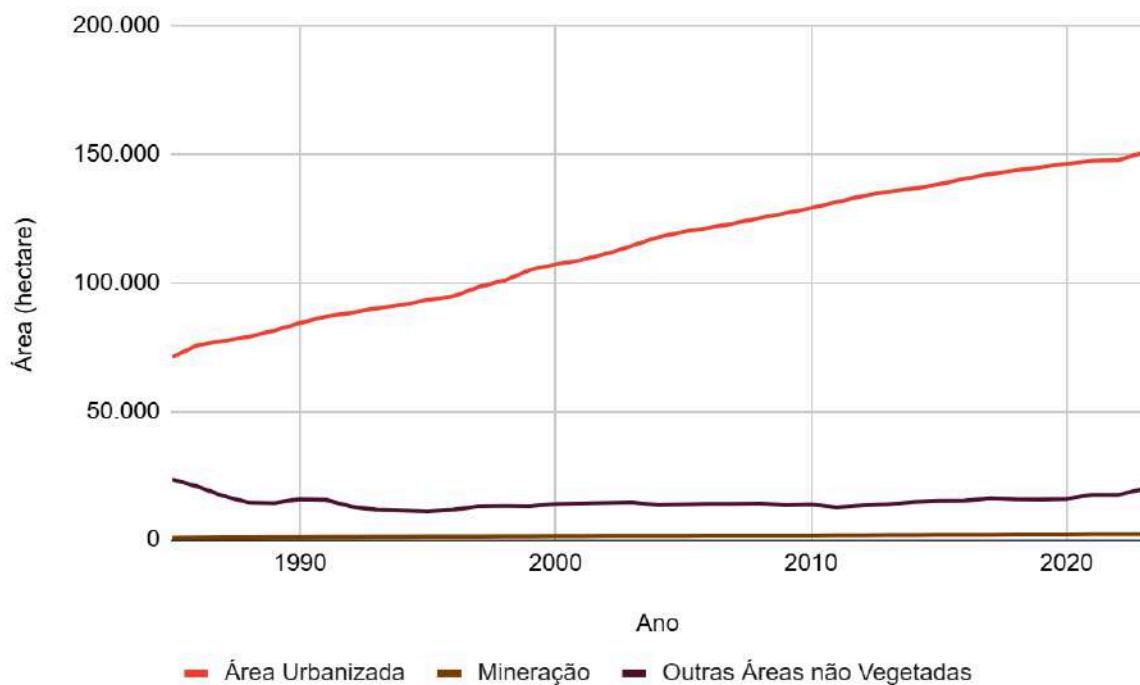
Gráfico 2: Distribuição das classes de agropecuária na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023



Fonte: MapBiomas, coleção 9. Elaborado por Autora (2025)

Em relação às áreas não vegetadas (Gráfico 3), o aumento de cerca de aproximadamente 71 mil hectares em 1985 para mais de 150 mil hectares em 2023 para a classe de área urbanizada representa um crescimento superior a 110%. A presença de mineração também pode ser vista com um aumento de 2,4% e nas outras áreas não vegetadas de menos de 1%.

Gráfico 3: Distribuição das classes de Áreas não Vegetadas na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023

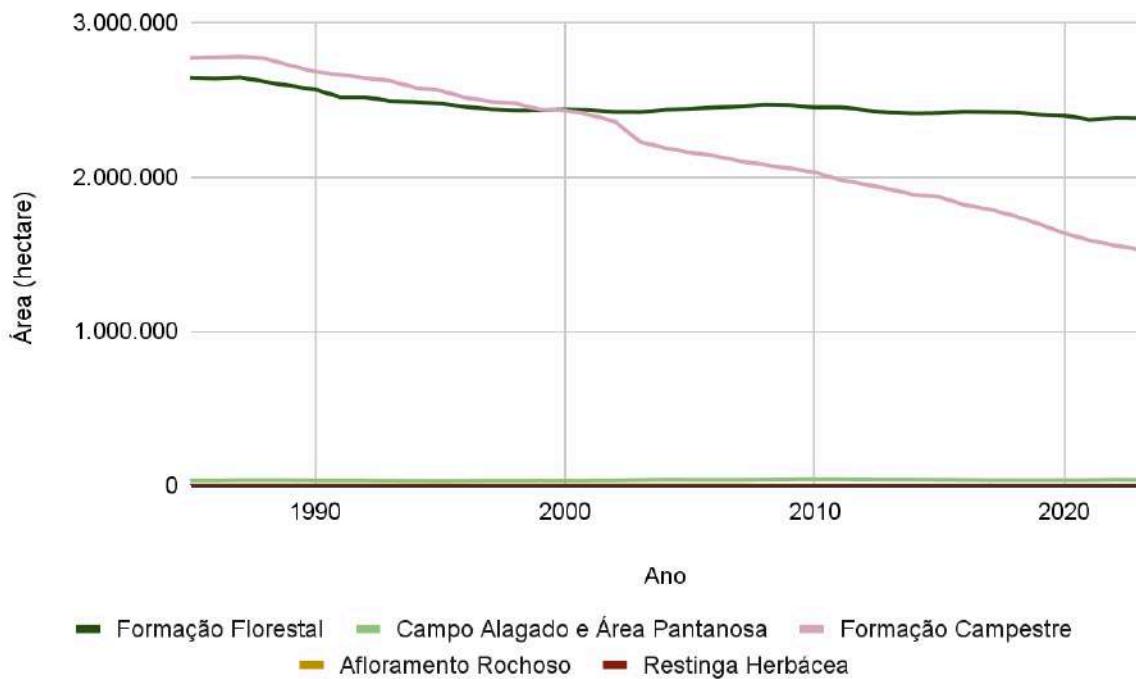


Fonte: MapBiomas, coleção 9. Elaborado por Autora (2025)

Identificar essas tais tendências corroboram para o entendimento da dinâmica da paisagem na RHG ao passo que áreas naturais, como áreas vegetadas, vêm ao longo de quatro décadas decaindo em área em hectare. É possível identificar a seguinte projeção pelo Gráfico 4 em que a formação campestre e formação florestal tiveram um decréscimo de 45% e de quase 10% respectivamente de sua área. Outras classes como restinga herbácea, campo alagado e área pantanosa, afloramento rochoso e restinga arbórea tiverem valores mínimos de

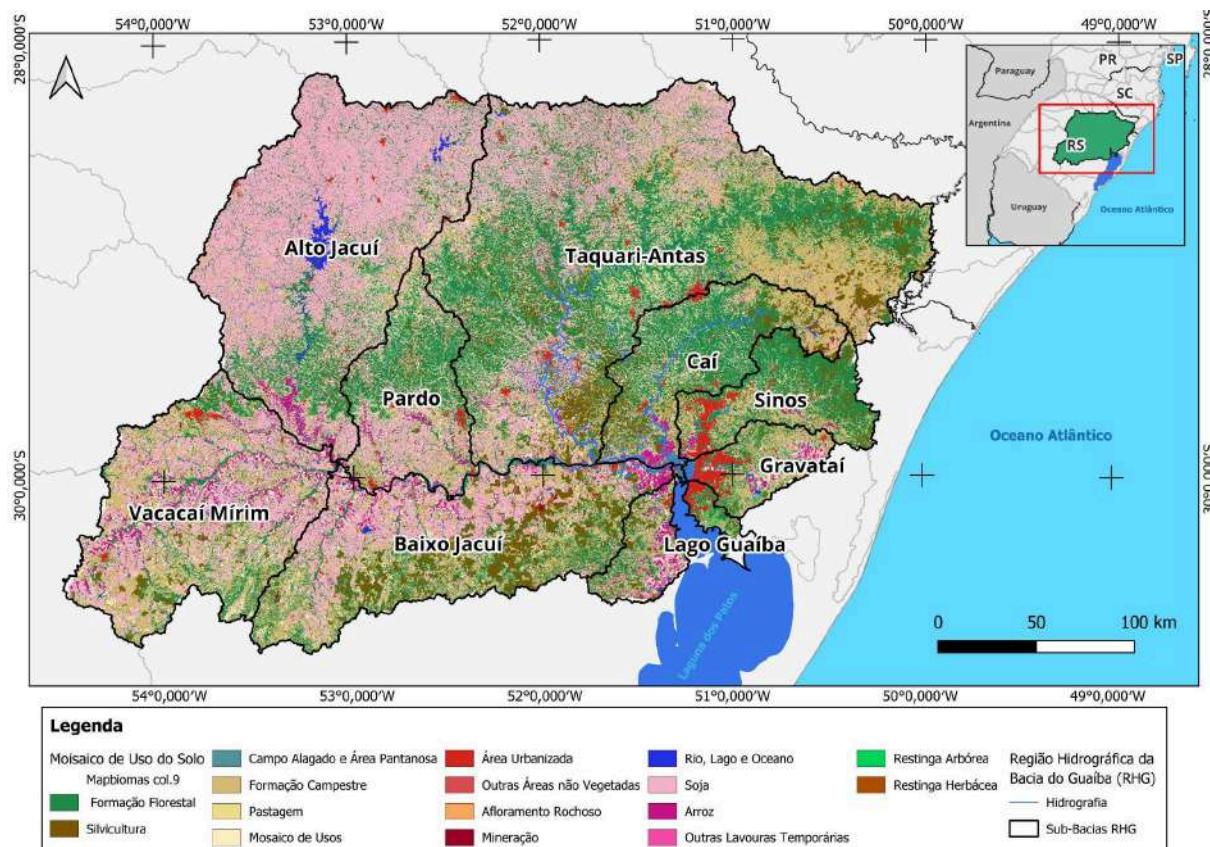
impactos ao comparados com outras categorias, e por esse motivo não foram feitas análises mais aprofundadas.

Gráfico 4: Distribuição das classes de Áreas Vegetadas na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) de 1985 a 2023



Dada o referido levantamento de dados, foi possível identificar onde se localizam tais classes e como elas se relacionam na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG). Segundo observações da **Figura 15**, as margens dos principais rios, como o Jacuí, Caí e Sinos, bem como zonas de várzea ao longo do Lago Guaíba e da Lagoa dos Patos, apresentam alta densidade de ocupação e uso intensivo para manejo da agropecuária como o caso de plantação de arroz e soja ao entorno dos rios. Essas zonas, que historicamente desempenharam papel fundamental na regulação dos regimes hidrológicos por meio da dissipação de cheias e retenção de sedimentos, encontram-se, em grande parte, degradadas ou convertidas para usos incompatíveis com suas funções naturais.

Figura 15: Mapa do Uso do Solo na RHG



Fonte: MapBiomas coleção 9. Elaborado pela Autora (2025)

Além das áreas próximas aos cursos hídricos, a figura revela a complexidade geográfica da região, destacando um mosaico de pressões antrópicas e vulnerabilidades ambientais. No setor norte da RHG, predomina o cultivo de soja, enquanto a nordeste sobressaem extensas áreas de pastagem. Embora essas regiões ainda conservam fragmentos de vegetação nativa em seu entorno, enfrentam pressões crescentes em escala paisagística, decorrentes da intensificação do uso do solo. Já no sul da bacia, atividades como silvicultura e mineração, ainda que concentradas em pontos específicos, agravam a erosão e a contaminação de corpos d'água, representando desafios adicionais para a gestão ambiental da região.

4. METODOLOGIA

Para avaliar a fragilidade ambiental diante de cenários de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG), a referente pesquisa adota abordagens qualitativas e quantitativas, com base em técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) aplicadas em escala de paisagem na região. Baseada em critérios estáticos, a fundamentação teórica concentra-se nas literaturas de Ross (1990; 1994) e Aloscious (2025) devido ao embasamento empírico que ambos fornecem para subsidiar estratégias de mitigação em contextos de planejamento territorial e gestão de riscos ambientais.

4.1. Procedimentos de Pesquisa

4.1.1 Fragilidade Ambiental

Com base nos estudos de Ross (1994; 1990), a metodologia para mapear a fragilidade ambiental fomenta-se na ideia que a natureza possui uma relação intrínseca entre os componentes físicos e humanos. Influenciado pelo Tricart (1977), para expressar os diferentes estados de equilíbrio dinâmico, Ross (1994) sistematizou uma hierarquia nominal de fragilidade representada por graus de estabilidade: Muito Estável (1), Estável (2), De transição (3), Instável (4) e Muito Instável (5). Representando a fragilidade dos ambientes, essas categorias expressam a relação aos processos causados pelo escoamento superficial difuso e concentrado das águas pluviais (Ross, 1994) em uma bacia hidrográfica a sofrerem erosão.

Conforme já destacado previamente, enquanto a fragilidade potencial refere-se a vulnerabilidade natural dos ambientes, a fragilidade ambiental ou emergente é também associada aos graus de proteção oferecidos pelos diferentes tipos de uso e cobertura do solo. Nesse contexto, a construção dos mapas inclui variáveis de relevo - no caso da pesquisa, especificamente declividade, pedologia, uso e ocupação do solo e a mancha de inundação mapeada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no período após as enchentes acometidas no estado do RS em maio de 2024. É importante observar que na metodologia do Ross (2024), não há referência com relação a mancha de inundação e, pelas fontes de dados de pedologia e uso do solo serem outras, ao comparar com o autor, as classes atribuídas de fragilidade tiveram que ser adaptadas. Abaixo segue a tabela com as seguintes classificações para cada grau.

Tabela 3: Grau de Fragilidade Ambiental associada por sua variável nesta pesquisa

Classe	Declividade	Pedologia		Uso do Solo	
Grau de Fragilidade	Ross (1994)	Ross (1994)	Autora (2025)	Ross (1994)	Autora (2025)
Muito Instável	Acima de 30 %	Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas.	Neossolo Litólico, Quartzarênico, Flúvico e Gleissolo Melânico e Háplico	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas	Pastagem, Praia, Duna e Areal
Instável	de 20 a 30 %	Podzólico Vermelho-amarelo textura média/arenosa, Cambissolos.	Cambissolo Húmico e Flúvico, Planossolo Hálico	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta do reino, laranja com solo exposto entre ruas), culturas de ciclo curto (arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão com cultivo em curvas de nível/ terraceamento).	Mosaico de Usos, Área Urbanizada, Outras Áreas não Vegetadas, Mineração, Soja, Arroz, Outras Lavouras Temporárias
De transição	de 12 a 20 %	Latossolo Vermelho-amarelo, Terra roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-amarelo textura média/ argilosa.	Nitossolo Vermelho e Bruno, Argissolo Vermelho-Amarelo, Vermelho e Bruno-Acidentado, Luvissolo Crômico e Háplico	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/ terrameamento como café, laranja com forrageiras entre ruas), pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas	Silvicultura, Restinga Herbácea
Estável	de 6 a 12 %	Latossolo Amarelo e Vermelho-amarelo textura média/ argilosa.	Chernozsolo Ebânico e Argilúvico	Formações arbustivas naturais com extrato herbáceo denso, formações arbustivas densas (mata secundária, Cerrado denso, Capoeira densa). Mata Homogênea de Pinus	Campo Alagado e Área Pantanosa, Formação Campestre, Afloramento Rochoso,

				densa, Pastagens cultivadas com baixo pisoteio de gado, cultivo de ciclo longo como o cacau	
Muito Estável	Até de 6%	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho Amarelo textura argilosa	Latossolo Vermelho e Bruno	Florestas; Matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade	Formação Florestal, Restinga Arbórea

Fonte: Ross (1994), adap. Autora (2025)

Para a variável de pedologia, foram utilizadas cartas 1:250.000 disponibilizadas no banco de dados geoespaciais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Em função das justificativas das classes, foi consultado o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). Abaixo segue a tabela com os tipos de solo que intersectam com a Região Hidrográfica com a Bacia do Guaíba (RHG) e sua respectiva classe de fragilidade justificada seguindo a literatura.

Tabela 4: Classificação do tipo de solo para Fragilidade Ambiental

Tipo de Solo	Sub-Ordem	Classe de Fragilidade Ambiental	Valor	Justificativa (Embrapa, 2018)
Gleissolo	Melânico	Muito Instável	5	Solos mal drenados, sujeitos a encharcamento.
	Háplico			Vulneráveis a processos erosivos e compactação.
Neossolo	Lítlico	Muito Instável	5	Solos rasos e pouco desenvolvidos.
	Quartzarênico			Altamente suscetíveis à erosão.
	Flúvico			
Cambissolo	Húmico	Instável	4	Solos jovens, com pouca estruturação.
	Flúvico			Vulneráveis à erosão.
Cambissolo	Húmico	Instável	4	Solos jovens, com pouca estruturação.
	Flúvico			Vulneráveis à erosão.

Planossolo	Hálico	Instável	4	Pouca drenagem e tendência ao encharcamento. Problemas de compactação e erosão quando manejados incorretamente.
Luvissolo	Crômico	De transição	3	Solos argilosos, moderadamente susceptíveis à erosão.
	Háplico			Podem ser mais frágeis em áreas inclinadas.
Nitossolo	Vermelho	De trasciação	3	Boa estrutura, mas sujeitos à erosão quando mal manejados.
	Bruno			São solos férteis, porém requerem cuidado em declives acentuados
Argissolo	Vermelho-Amarelado	De trasciação	3	Presença de horizonte B textural (argila acumulada).
	Vermelho			Menor infiltração de água, o que pode aumentar erosão em declives.
	Bruno-Acizentado			
Chernozsolo	Ebânico	Estável	2	Solos ricos em matéria orgânica, de alta fertilidade.
	Argilúvico			Boa estrutura e menor susceptibilidade à erosão.
Latossolo	Vermelho	Muito Estável	1	Profundos, alta permeabilidade e estabilidade estrutural; Resistentes à erosão.
	Bruno			

Fonte: Santos (2018), adap. Autora (2025)

A classificação do uso do solo foi baseada nos dados disponibilizados pelo *MapBiomas*, que fornece códigos para download via Google Earth Engine (GEE), permitindo a visualização de mapas em diferentes escalas e períodos. Assim, para referente pesquisa, foi baixada imagem de cobertura para os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023 respectivamente para a RHG, da mesma forma, foi também atribuído os valores de fragilidade a partir da fisionomia do grau de cobertura sendo essencial do ponto de vista da erosão. A **Tabela 5** com a classificação do tipo de uso do solo se encontra a seguir.

Tabela 5: Classificação do tipo do uso do solo para Fragilidade Ambiental

Classe	Código (Mapbio mas col. 9)	Classe da Fragilidade Ambiental	Valor da Fragilidade	Justificativa (Ross, 1984; 1990)
Pastagem	15	Muito Instável	5	Solo exposto com atividades por sobrepastoreio
Praia, Duna e Areal	23	Muito Instável	5	Solo exposto
Mosaico de Usos	21	Instável	4	Áreas de uso misto
Outras Áreas não Vegetadas	25	Instável	4	Impermeabilização do solo
Mineração	30	Instável	4	Solo exposto
Soja	39	Instável	4	Monocultura intensiva
Arroz	40	Instável	4	Monocultura intensiva
Outras Lavouras Temporárias	41	Instável	4	Monocultura intensiva
Área Urbanizada	24	Instável	4	Impermeabilização do solo
Silvicultura	9	De trascição	3	Embora haja cobertura do solo, é um sistema artificial com espécies exóticas (eucalipto/pinheiro)
Restinga Herbácea	50	De trascição	3	Vegetação rasteira
Campo Alagado e Área Pantanosa	11	Estável	2	Vegetação natural de campo.
Formação Campestre	12	Estável	2	Vegetação natural de campo.
Afloramento Rochoso	29	Estável	2	Vegetação natural de campo.
Apicum	32	Estável	2	Ambientes salinos de transição em áreas costeiras.

Formação Florestal	3	Muito Estável	1	Vegetação nativa bem estruturada com alta proteção do solo
Restinga Arbórea	49	Muito Estável	1	Vegetação nativa

Fonte: MapBiomas, col. 9. Adap. Autora (2025)

Para os dados de declividade, foi extraído o modelo digital de elevação (MDE) através de um plugin no software QGis 3.32.3 chamado “OpenTopography DEM Downloader”, em que, ao recortar a área de interesse, retorna o MDE pelo banco de dados. O modelo selecionado foi o SRTM 30 metros, que significa Shuttle Radar Topography Mission (Missão de Topografia por Radar do Ônibus Espacial) com 30 metros de resolução espacial. Adiante será discutido com maior profundidade o que significa tal valor. Por o SRTM retornar valores de altimetria, foi necessário utilizar outro plugin chamado “Slope”, pelo qual extraiu através do MDE os valores em porcentagem de cada declividade, necessário para reclassificar da mesma forma que a metodologia proposta por Ross (1994) na **tabela 3**.

A mancha de inundação, como mencionado e o observado na **Figura 8**, refere-se a área inundada pela enchente de maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul. Ela recebeu o valor 5 (Muito Instável) por compreender ser uma área já mapeada como suscetível a desastres socioambientais, além também de ser uma área plana, como uma planície de inundação, ao receber todo o acúmulo de sedimentos a montante dos rios. O IPH/UFRGS (2024), responsável pelo mapeamento, estimou as áreas de inundação em escala regional (nível de paisagem), com menor detalhamento devido à falta de dados precisos em alguns municípios. O estudo abrange a Região Metropolitana, compreendendo o Vale do Sinos, Gravataí, Caí, Jacuí e as margens do Lago Guaíba.

4.1.2. Fragilidade Ambiental sob SbN

Embora o objetivo do trabalho não seja implementar cenários de restauração de forma estratégica na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG), a pesquisa se fundamenta na ideia abordada por Aloscious (2025) de “cidades esponjas” e Oliveira (2023) sobre cidades de infraestrutura verde. De maneira generalizada, se espera sobrepor áreas degradadas de solo exposto ou com alta impermeabilização do solo - valores de fragilidade 4 (Instável) e 5 (Muito Instável) - com áreas de formação florestal - valor 1 (Estável) - segundo

a base de dados de uso e ocupação do MapBiomas (2024). Essa reclassificação de valores pode ser observada na **Tabela 6**.

Tabela 6: Classificação do tipo do uso do solo para Fragilidade Ambiental sob SbNs

Classe	Classe da Fragilidade Ambiental	Valor da Fragilidade
Pastagem	Restauração Florestal	1
Praia, Duna e Areal	Restauração Florestal	1
Mosaico de Usos	Restauração Florestal	1
Outras Áreas não Vegetadas	Restauração Florestal	1
Mineração	Restauração Florestal	1
Soja	Restauração Florestal	1
Arroz	Restauração Florestal	1
Outras Lavouras Temporárias	Restauração Florestal	1
Área Urbanizada	Restauração Florestal	1
Silvicultura	De trascição	3
Restinga Herbácea	De trascição	3
Campo Alagado e Área Pantanosa	Estável	2
Formação Campestre	Estável	2
Afloramento Rochoso	Estável	2
Apicum	Estável	2

Formação Florestal	Muito Estável	1
Restinga Arbórea	Muito Estável	1

Fonte: Autora (2025)

Conforme anteriormente discutido Soluções Baseadas na Natureza (SbN) são definidas como estratégias que visam conservar, manejar e restaurar ecossistemas naturais ou alterados, com o objetivo de enfrentar desafios sociais, como mudanças climáticas e desastres naturais, promovendo benefícios tanto para o ambiente quanto para as comunidades (OLIVEIRA, 2023). Dentro desse escopo, a restauração florestal se destaca como uma abordagem voltada à recuperação de ecossistemas florestais, permitindo que a natureza alterada pela ação humana restabeleça sua relação com a vegetação nativa ou com o próprio ambiente natural como um todo.

Por se tratar de uma área extensa, a Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) compreende tanto zonas urbanas quanto rurais, enfatizando que sua diversidade territorial exige a aplicação de diferentes práticas de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), adequadas a cada contexto. Em áreas urbanas, por exemplo, Aloscious (2025) destaca iniciativas implementadas em cidades como Kochi, na Índia, onde as SbN incluem a criação de florestas urbanas e a restauração de planícies de inundação. Outro exemplo é o Projeto Kawaki citado pelo autor (op cit.), que conduzido por comunidades locais, promove o plantio de espécies nativas com o objetivo de aumentar a infiltração de água no solo e fortalecer os ecossistemas.

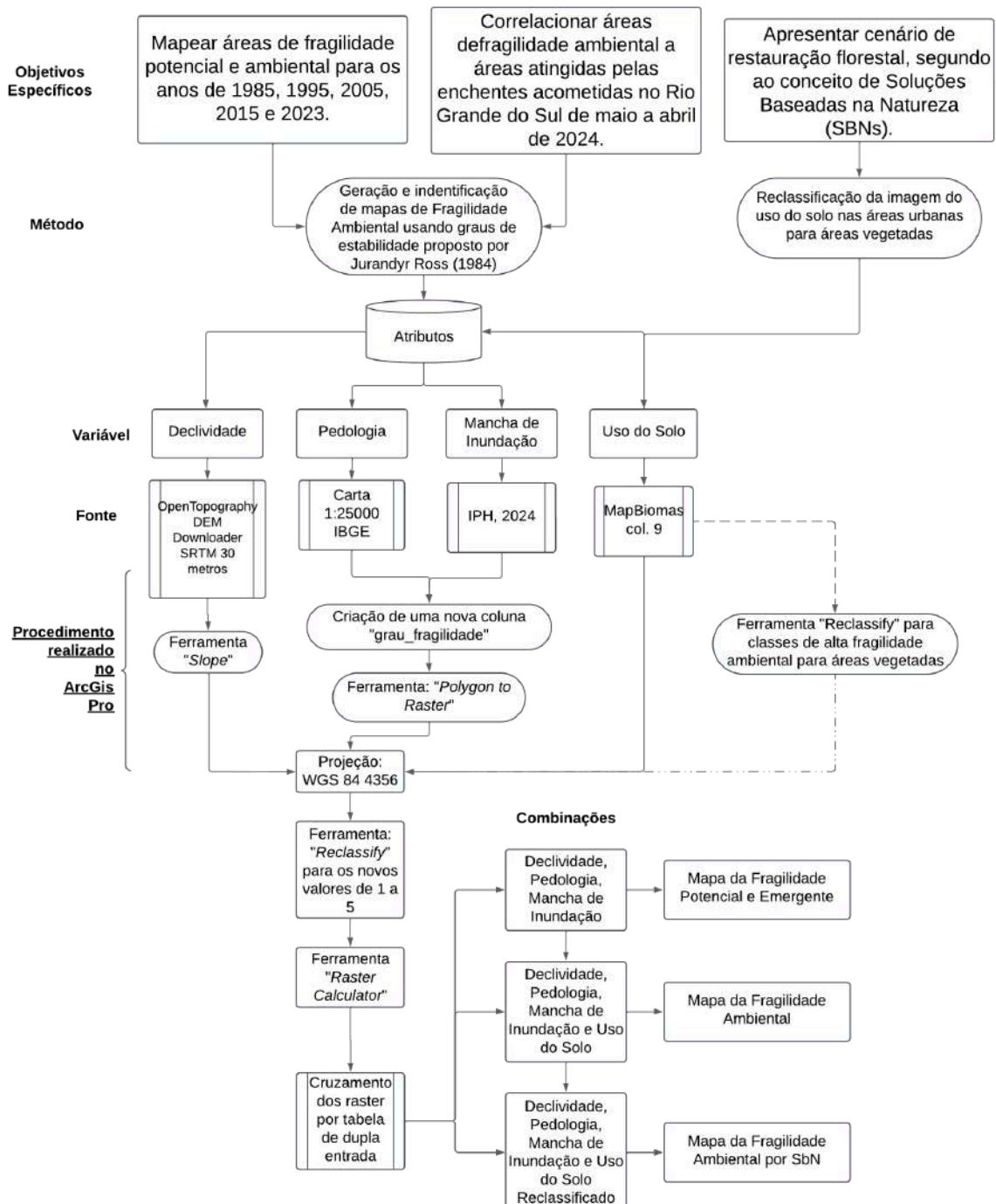
A restauração florestal, nesse contexto, é compreendida como uma SbN essencial que vai além do plantio de árvores. Ela abrange a reabilitação de ecossistemas inteiros — como cabeceiras e áreas alagáveis —, a implantação de corredores verdes e florestas urbanas, e o uso estratégico de vegetação para reduzir riscos ambientais (ALOSCIOUS, 2025). Nesse sentido, entende-se que promover a biodiversidade e melhorar a qualidade de vida por meio da restauração no ecossistema é um passo importante para minimizar a magnitude de eventos catastróficos como a enchente que assolou o estado do Rio Grande do Sul em maio de 2024.

4.2. Desenvolvimento Operacional

Com a base de dados fundamentada, o desenvolvimento operacional concentrou-se na utilização de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para viabilizar a análise espacial e a representação dos dados geográficos. Nesse contexto, e em consonância

com os objetivos específicos da pesquisa, o fluxo das atividades foi conduzido conforme apresentado na **Figura 16**.

Figura 16: Fluxograma das atividades realizadas para o desenvolvimento operacional da pesquisa.



Elaborado pela Autora (2025)

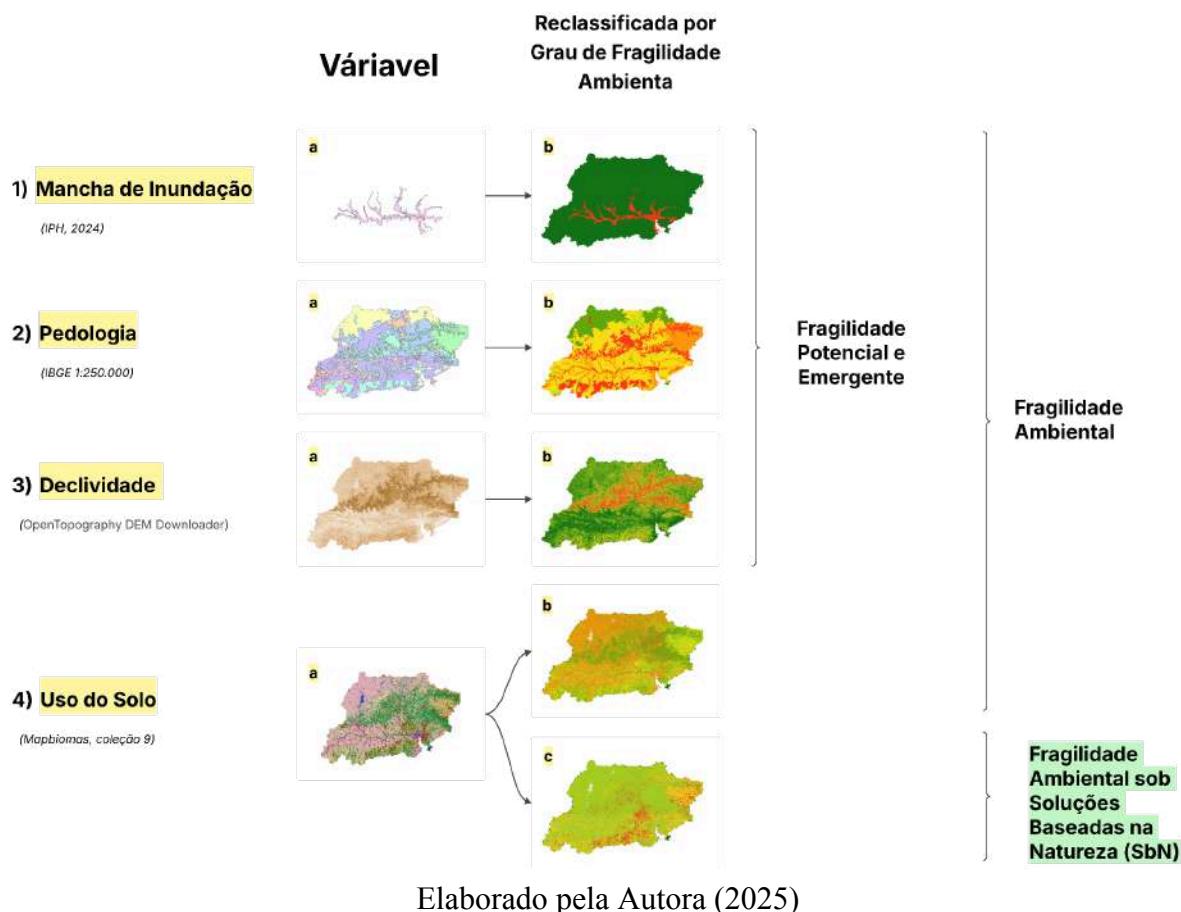
Como descrito na **Figura 16**, a fim de gerar e identificar os mapas de fragilidade, foram necessários o levantamento dos atributos dos mesmos pelas suas respectivas fontes.

Operacionalizado no software ArcGis Pro, os dados a depender do seu formato, se é vetorial ou raster, tiveram que passar por uma série de procedimentos específicos de padronização.

No caso do dado de declividade, mesmo em seu formato raster, para que este pudesse ser incorporado às análises espaciais, foi utilizada a ferramenta “Slope”, que calcula a inclinação do terreno a partir do modelo digital de elevação (MDE) obtido por imagem SRTM, convertendo os valores de altimetria em porcentagens de declividade. Já os dados de pedologia e da mancha de inundação, originalmente em formato vetorial, foi criada uma nova coluna nas respectivas tabelas de atributos, denominada “grau_fragilidade”, contendo valores inteiros de 1 a 5, conforme os critérios definidos na etapa anterior (ver Capítulo 4.1.1. para mais detalhes). Com essa classificação atribuída, aplicou-se a ferramenta “Polygon to Raster”, convertendo os dados vetoriais em formato raster, condição necessária para sua utilização nas operações dos mapas de fragilidade dentro do ambiente SIG.

Com o ajuste do formato dos dados, a reclassificação das variáveis foi uma etapa fundamental para garantir a padronização dos dados segundo os graus de estabilidade propostos por Ross (1994), variando de 1 (Muito Estável) a 5 (Muito Instável). A seguir, são apresentados os resultados desse processo para cada variável analisada. Observa-se que, na coluna intitulada “Variável” (a), os dados mantêm sua aparência original, enquanto na coluna “Reclassificada por grau de fragilidade” (b ou c), os mapas foram representados por uma escala cromática que varia do verde claro (Muito Estável) ao vermelho escuro (Muito Instável), refletindo os diferentes níveis de fragilidade ambiental atribuídos a cada classe (**Figura 17**).

Figura 17: Fluxograma das atividades realizadas para a reclassificação dos dados quanto ao grau de Fragilidade Ambiental



Na **Figura 17** é possível identificar o que cada variável contribui para cada mapa final de fragilidade mapeado. Nota-se, portanto, que para o mapa de fragilidade potencial e emergente foram usadas as variáveis mancha de inundação (1a), pedologia (2a), declividade (3a), enquanto para o mapa de fragilidade ambiental ou emergente, para além das mesmas variáveis, foi incorporado o uso do solo de acordo com seu respectivo ano de pesquisa (4a). Em destaque, para o mapa de fragilidade ambiental sob Soluções Baseadas na Natureza, é importante ressaltar que sua principal diferença consiste na realização de uma reclassificação dos dados do uso do solo da coleção 9 do MapBiomas (2024) para as classes estabelecidas como áreas de restauração florestal (tabela 6), dessa forma a variável 4c juntamente com os dados 1a, 2a, 3a incorporam o que proponho na presente pesquisa.

Para a álgebra dos mapas, os procedimentos realizados para geração dos mapas finais utilizaram como base a metodologia de tabela de dupla entrada - também conhecida como tabela bidimensional (KAWAKUBO et. al. 2005), que permite que as combinações entre pixels de cada variável fossem realizadas de forma pareada, isto é, se cada pixel de uma imagem raster possui um relativo valor (grau de fragilidade), ao cruzar com outro pixel de outra variável, resulta na saída de um terceiro pixel combinado. Nesse sentido, seguindo com a proposta de Kawakubo et. al. (2005), as seguintes regras foram adotadas: quando os graus de fragilidade tiverem o mesmo valor, mantém-se esse grau de fragilidade; quando a combinação é de classes com graus diferentes, a fragilidade resultante será aquela mais forte (MORATO, 2000 apud. KAWAKUBO et. al. 2005).

Com tal metodologia definida, foi possível identificar os diferentes graus de fragilidade dentro da Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) utilizando a ferramenta “Raster Calculator” no ArcGIS Pro a partir da seguinte expressão:

Tabela 7: Exemplo de expressão por cruzamento das variáveis pela tabela bidimensional para seleção do grau de fragilidade sob SbN predominante

```
Con (
    ("declividade.tif" > "mancha.tif") &
    ("declividade.tif" > "pedologia.tif") &
    ("declividade.tif" > "2023_SBN.tif"),
    "declividade.tif",
    Con (
        ("mancha.tif" > "pedologia.tif") &
        ("mancha.tif" > "2023_SBN.tif"),
        "mancha.tif",
        Con (
            ("pedologia.tif" > "2023_SBN.tif"),
            "pedologia.tif",
            "2023_SBN.tif"
        )
    )
)
```

Elaborado pela Autora (2025)

Uma vez realizadas as combinações entre as diferentes variáveis por meio da sobreposição dos pixels, a análise pôde se apoiar nos mapas sínteses resultantes dessas operações. É importante destacar que os dados utilizados possuem resolução espacial de 30 metros, o que significa que cada pixel representa uma área de 30 x 30 metros na superfície terrestre, totalizando 900 m². Embora essa resolução não proporcione o mais alto nível de detalhamento, ela é amplamente utilizada em estudos de escala de paisagem por oferecer uma

cobertura regional eficaz, mesmo que generalizada, capturando padrões espaciais significativos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apontado por Ross (1990), qualquer interferência humana na natureza demanda, obrigatoriamente, um diagnóstico ambiental em que se pretende atuar — exigência que, na prática, é frequentemente negligenciada em projetos de infraestrutura e urbanização. A tragédia de maio de 2024 no Rio Grande do Sul ilustra essa falha, evidenciada não apenas pelas deficiências estruturais, como a manutenção precária de diques e casas de bombas, mas também pela ausência de investimentos adequados em gestão de riscos e no mapeamento das fragilidades dos ambientes.

É nesse contexto que se insere a abordagem adotada neste trabalho, a qual não se fundamenta em modelos dinâmicos de simulação de processos — como os de escoamento superficial ou transporte de sedimentos — em que alterações nas áreas de cabeceira reverberam automaticamente a jusante. Ao contrário, trata-se de um modelo de pré-disposição, de natureza empírica baseado em critérios conhecidos, que busca compreender a fragilidade ambiental a partir das características estruturais da paisagem. Embora o relevo ofereça uma base analítica sólida, ele não é aqui considerado como um sistema que reage em tempo real às pressões antrópicas, mas como uma referência para indicar o grau de suscetibilidade das áreas a impactos ambientais.

A partir desse referencial teórico, torna-se possível reconhecer tanto as vulnerabilidades naturais quanto aquelas agravadas por ações humanas — reconhecimento fundamental para o zoneamento territorial e a formulação de políticas públicas eficazes. Como apontam Ruckert et al. (2024), a catástrofe no Rio Grande do Sul foi amplamente anunciada. É justamente nessa premissa — da existência de evidências prévias não consideradas — que se analisa o presente estudo.

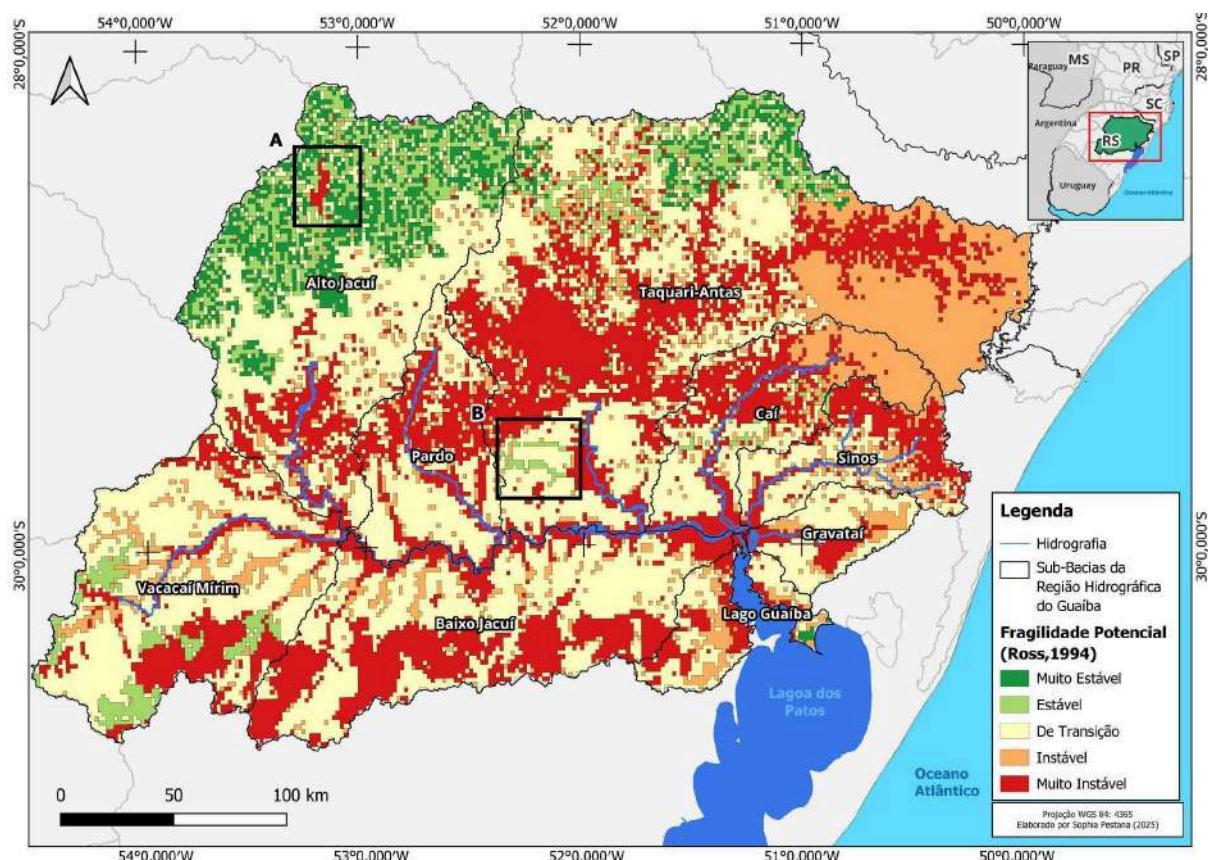
5.1. Fragilidade Potencial na RHG

A chamada fragilidade potencial, como mencionado anteriormente, diz respeito a áreas que já possuem pré-disposição à fragilidades estruturais, por conta de sua formação geológica e geomorfológica. Mesmo sem ocupação humana, elas já se apresentam sensíveis,

mas quando ocupadas — ainda que de forma menos intensa— podem sofrer alterações bruscas, como deslizamentos ou erosão acelerada. Como explica Ross (1994), trata-se de uma instabilidade previsível, relacionada tanto às características do ambiente quanto à possibilidade de ocupação humana.

De acordo com o **Figura 18**, a Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG) apresenta aproximadamente 7.316.582,63 hectares classificados com algum grau de instabilidade potencial (86,2 % do território), distribuídos majoritariamente ao longo dos trechos montante e jusante dos cursos d’água. As áreas com maior instabilidade (em vermelho) abrangem cerca de 2.392.844,34 hectares (28%), enquanto as áreas instáveis (em laranja) somam 1.330.459,98 hectares (15%). Além disso, 3.593.278,31 hectares (49%) foram identificados como áreas em condição de transição, caracterizadas por estarem sujeitas a processos ativos de pedogênese e morfogênese (TRICART, 1977), o que as torna potencialmente frágeis.

Figura 18: Mapa da Fragilidade Potencial na RHG



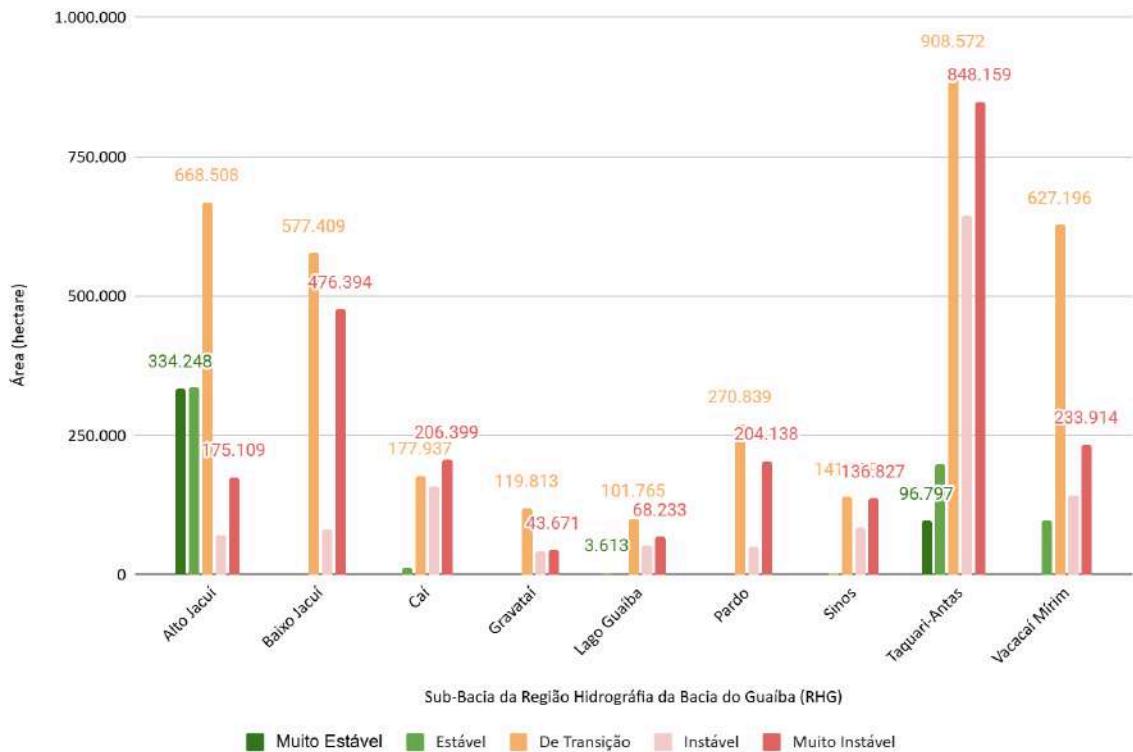
Elaborado pela Autora (2025)

A concentração de áreas com alta fragilidade na RHG resulta, principalmente, de dois fatores: (i) os critérios adotados na análise espacial e (ii) as características físico-naturais das paisagens. Destacam-se, por sua vez, os Planaltos das Araucárias (Alto Jacuí e Taquari-Antas) e o Planalto Sul-Riograndense (Baixo Jacuí e Vacacaí-Mirim), que concentram grandes extensões com elevado grau de instabilidade. Essa vulnerabilidade decorre, em grande medida, da interação entre fatores pedogenéticos — como a presença de Neossolos e Nitossolos, de baixa resistência — e elementos morfológicos, como a acentuada declividade e o forte compartimento do relevo.

Nesse contexto, o mapa também evidenciou duas características distintas em quadrantes específicos (A e B). A Região A, no Alto Jacuí, em seu entorno apresenta Latossolos com declividades suaves (3% a 6%) e é classificada como estável. No entanto, um ponto vermelho indica a presença de Neossolo, solo raso e erodível, justificando a instabilidade pontual. Já a Região B, em Taquari-Antas, mesmo a região ao entorno ser combinada por Nitossolo e Neossolo - características de áreas instáveis -, no referente perímetro foi classificada como estável devido a configuração do relevo ser mais moderada além da presença pontual de Luvissolos, que sendo solos mais profundos, eles se comportam diferentes para cada substrato (GUERRA et. al. pg. 94 - 98).

Essas particularidades evidenciam a necessidade de contextualizar os padrões observados na análise por sub-bacia (Gráfico 5), que revela a Taquari-Antas como a unidade com a maior extensão de áreas classificadas como muito instáveis (848.159 ha.), seguida por Baixo Jacuí (476.394 ha.) e Vacacaí-Mirim (233.914 ha.). Das nove sub-bacias que compõem a RHG, apenas quatro apresentam áreas com algum grau de estabilidade, embora com valores bastante distintos. O Alto Jacuí destaca-se por sua heterogeneidade ambiental, com 175.109 hectares classificados como “muito instável” e 334.248 hectares como “muito estável”, sendo esta a maior extensão de estabilidade registrada em toda a região.

Gráfico 5: Distribuição por área em hectare da Fragilidade Potencial na RHG



Elaborado pela Autora (2025)

Outras sub-bacias, como Caí, Sinos, Gravataí, Pardo e Lago Guaíba, apresentam extensões menores em todas as classes de instabilidade, mas trazem à tona discussões relevantes sobre as áreas classificadas como de transição. Embora frequentemente associadas a relevos planos ou suavemente ondulados, com solos de resistência moderada à erosão, essas regiões revelam fragilidades ambientais significativas. Predominantemente inseridas na Depressão Central Gaúcha sob rochas sedimentares, essas sub-bacias em transição ocupam planícies que atuam como zonas de recepção dos fluxos superficiais oriundos das áreas mais elevadas da bacia, o que as torna suscetíveis ao acúmulo de água e à ocorrência de processos hidrológicos intensos.

A análise desses padrões reforça a predominância de ambientes frágeis na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG), ao mesmo tempo em que destaca a importância de considerar as especificidades geomorfológicas locais na avaliação da fragilidade ambiental. Ecossistemas instáveis tendem a ser mais suscetíveis à ação da dinâmica fluvial e aos processos erosivos, o que acarreta alterações significativas no relevo e compromete a estabilidade dos solos (ROSS, 1994). Essa predisposição natural se agrava quando associada a eventos climáticos extremos, como se verificou no Vale do Taquari, em maio de 2024. Na

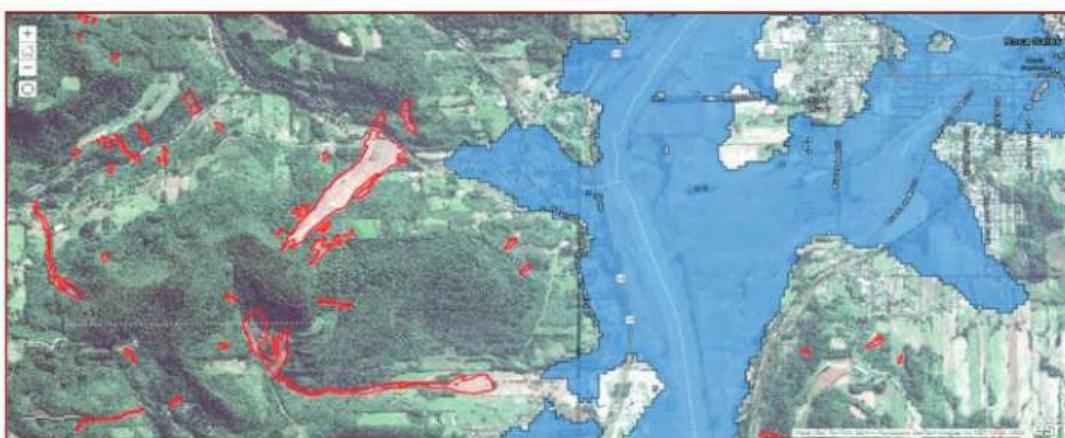
ocasião, a região foi uma das mais severamente atingidas pelas enchentes no estado, registrando 34 mortes e 20 desaparecidos em 15 municípios (Defesa Civil, 2024). Em Roca Sales, por exemplo, foram identificados 16.862 pontos de ruptura (FILHO, 2024 apud RUCKERT, 2024), revelando a vulnerabilidade de áreas com declividades acentuadas e solos pouco consolidados (**Figura 19** e **Figura 20**).

Figura 19: Deslizamentos de encostas na Serra Geral no município de Santa Tereza, Vale do Rio Taquari



Fonte: Foto com drone de Clodis Andrade Filho, 2024 apud Rückert (2024)

Figura 20: Planície de inundação no Vale do rio Taquari em Roca Sales com destaque para deslizamentos de encostas (em vermelho)



Fonte: Pesquisa e organização de Clódis Andrade Filho; Lorenzo Fossa Sampaio Mexias, 2024. Disponível em: <https://arcg.is/ezjvW> apud Rückert (2024)

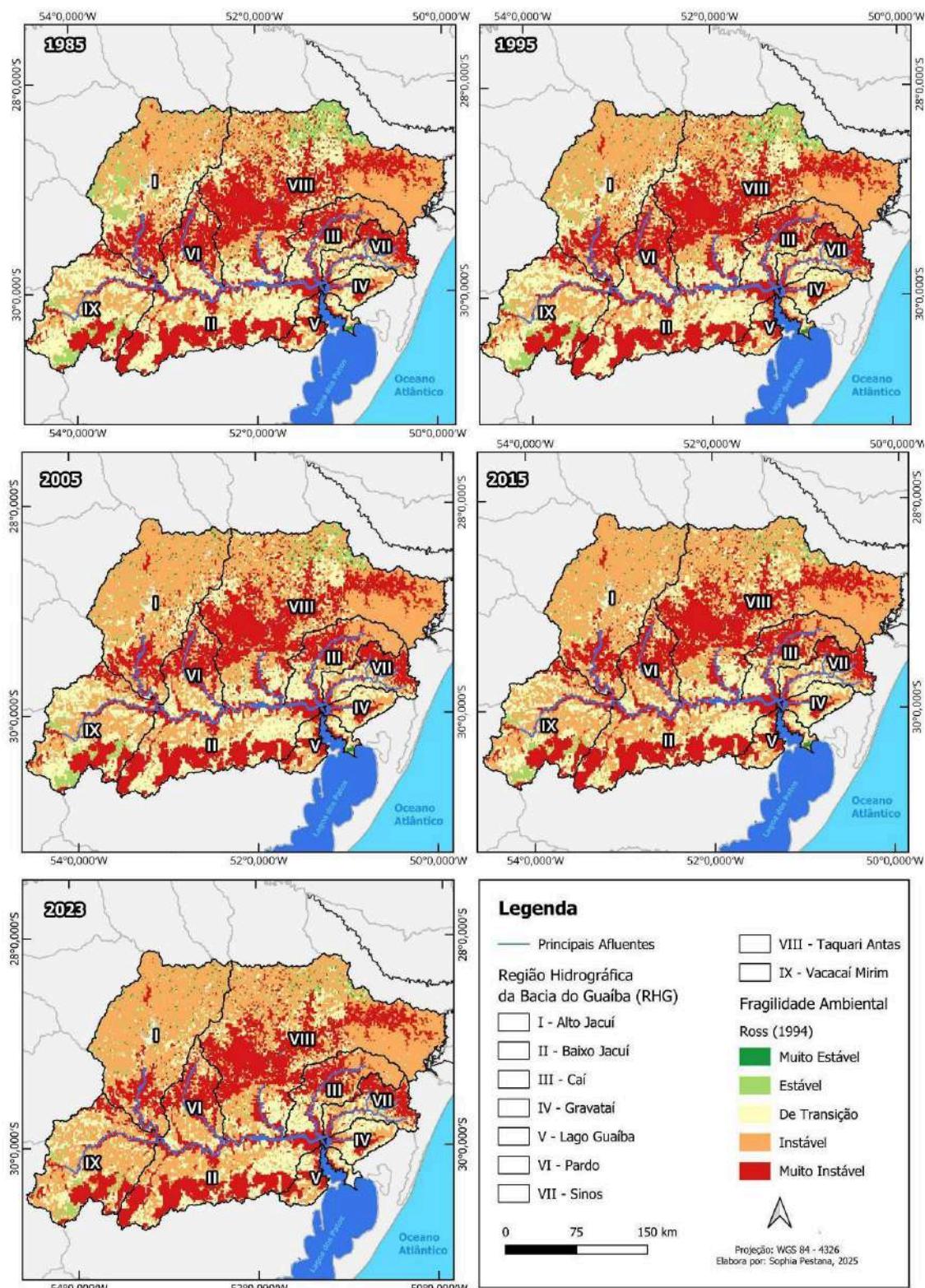
Esses eventos recentes ilustram como ambientes com fragilidade potencial — especialmente em altitudes elevadas, com solos rasos ou em planícies de inundação — podem se converter rapidamente em zonas de risco sob influência de chuvas extremas. Conforme Ross (1994), tais áreas já apresentam vulnerabilidade inerente devido a seus atributos físico-naturais, sendo que processos externos, mesmo sem interferência antrópica, podem intensificar sua instabilidade. Essa premissa ressalta a importância de considerar tais condicionantes naturais no planejamento territorial e em estratégias preventivas, independentemente da presença humana.

5.2. Fragilidade Ambiental na RHG

A análise da fragilidade ambiental (Ross, 1994; 2020) considera o uso e ocupação da terra como uma variável fundamental na dinâmica do relevo, uma vez que as ações humanas podem acentuar os processos potencialmente erosivos em determinadas bacias. Aplicando essa abordagem à Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG), no período de 1985 a 2023, é possível identificar uma relação direta entre o acúmulo histórico de vulnerabilidades antrópicas e os impactos observados nas enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul. Ao longo dessas décadas, a fragilidade ambiental da RHG aumentou de forma significativa, com a

expansão de áreas instáveis, principalmente devido a ampliação dos cultivos de arroz nas margens dos rios, extensa produção de soja e a redução de áreas anteriormente estáveis, especialmente nos setores acentuados ao norte da bacia como ilustrada na **Figura 21**.

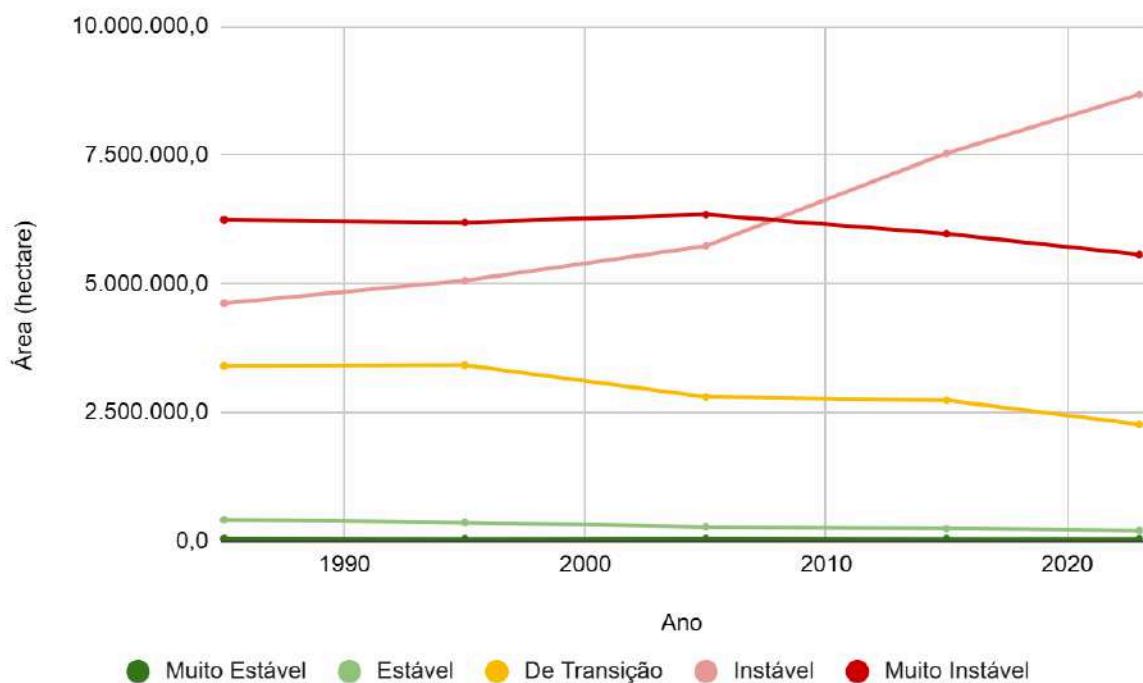
Figura 21: Comparativo entre os mapas de Fragilidade Ambiental entre os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023



Elaborado pela Autora (2025)

Ao extrair as proporções médias por grau de fragilidade na RHG, nota-se que ao longo dos anos houve redução nas categorias "Estável" (-50,6%) e "De Transição" (-33,5%), acompanhada por um expressivo crescimento nas áreas "Instáveis" (+87,7%). Embora a categoria "Muito Instável" tenha registrado um leve declínio (-10,8%) devido a possíveis migrações de classes de fragilidade, isto é, a alterações de usos da terra, ela ainda representa um destaque contínuo ao longo do período analisado. Como mostra o Gráfico 6, observa-se como áreas estáveis progridem ao darem mais condições para criação de áreas instáveis. Esse processo está relacionado ao avanço da agropecuária sobre áreas vegetativas na região, acompanhado da redução contínua das florestas e da vegetação arbustiva e herbácea, conforme indicado no Gráfico 1 nas características da área de estudo.

Gráfico 6: Distribuição por área em hectare da Fragilidade Ambiental da RHG nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023.



Elaborado pela Autora (2025)

Nesse contexto, a análise das classes de fragilidade ambiental nas sub-bacias da RHG evidencia padrões espaciais e temporais distintos de estabilidade e instabilidade por referente

ano (Apêndice A). E que, por sua vez, a tendência, ou seja, a comparação entre os anos de 1985 e 2023, abrangendo um período de 38 anos, permite captar essa complexidade, marcada por processos como a modernização agrícola e a urbanização generalizada no território.

Tabela 8: Análise de tendência de 1985 vs 2023 por sub-bacia na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG)

Sub-bacia	Muito Estável	Estável	De Transição	Instável	Muito Instável
1. Cai	-	-11,10%	12,40%	3,90%	-15,80%
2. Pardo	-	-50,30%	-50,30%	115,80%	-22,10%
3. Vacacaí-Mirim	-	-37,10%	-41,80%	114,80%	-1,30%
4. Taquari-Antas	-9,40%	-52,80%	-25,50%	49,40%	-14,10%
5. Baixo Jacuí	-	-	-36,90%	177,50%	0,0005
6. Sinos	-	0%	-23,70%	1,70%	-1,60%
7. Lago Guaíba	-100%	-	-46,90%	3,80%	0,60%
8. Alto Jacuí	-1,20%	-59,70%	-46,10%	60,90%	-12,90%
9. Gravataí	-	-	-1,60%	8,60%	0,50%

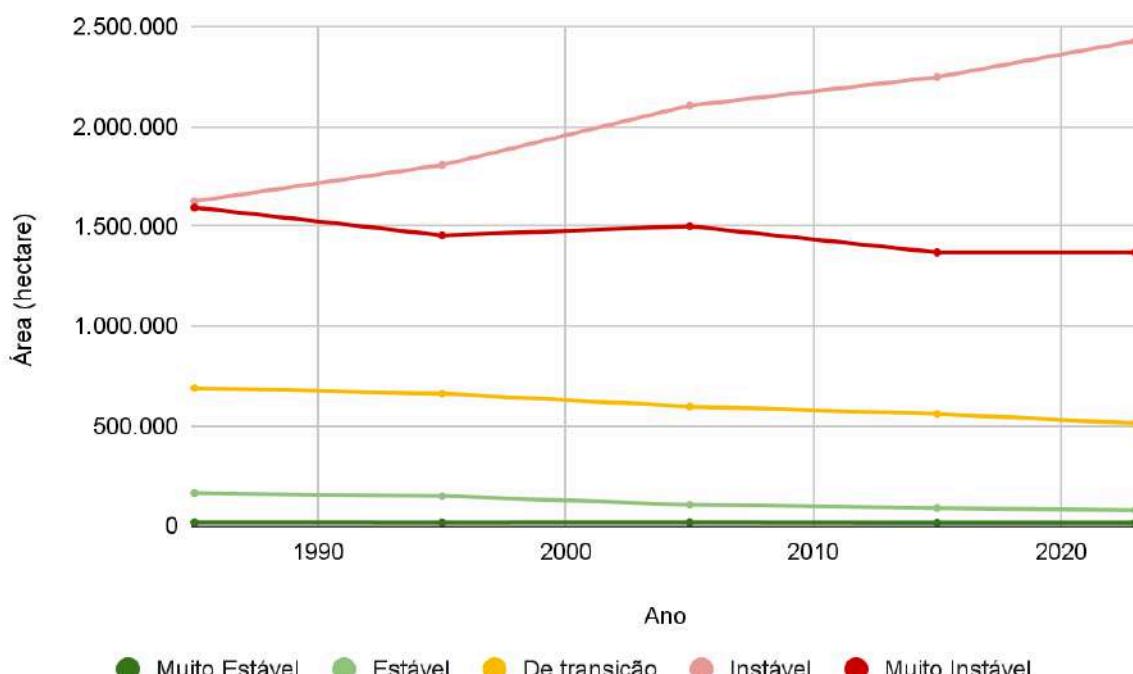
Elaborado pela Autora (2025)

Apesar das expectativas de que políticas públicas como a implementação do Código Florestal (Lei 12.651, de 25 de maio de 2012) e ordenamento territorial mitigassem os impactos ambientais ao longo das últimas décadas, os resultados observados revelam um cenário preocupante. A classe 'Muito Estável' foi completamente extinta em áreas como o Lago Guaíba (redução de 100%), enquanto a classe 'Estável' registrou quedas acentuadas no Alto Jacuí e Taquari-Antas (-59,7% e -52,8%, respectivamente). Essa drástica redução na estabilidade ambiental correlaciona-se diretamente com a expansão agropecuária, particularmente o crescimento de 440% na área cultivada de soja nessas sub-bacias.

Essa transformação estrutural manifestou-se dramaticamente durante os eventos extremos de 2024, quando se evidenciou uma relação direta entre a perda de estabilidade e a intensificação de enchentes na bacia Taquari-Antas. A configuração em vale da região,

naturalmente propícia à concentração de fluxos hídricos e sedimentares das áreas montantes para jusante (CHRISTOFOLETTI, 1980), tornou-se particularmente vulnerável. Conforme apresentado no Gráfico 7, a fragilidade ambiental da sub-bacia aumentou progressivamente, impulsionada pela combinação de características pedológicas naturais e pelas transformações no uso do solo em seu entorno.

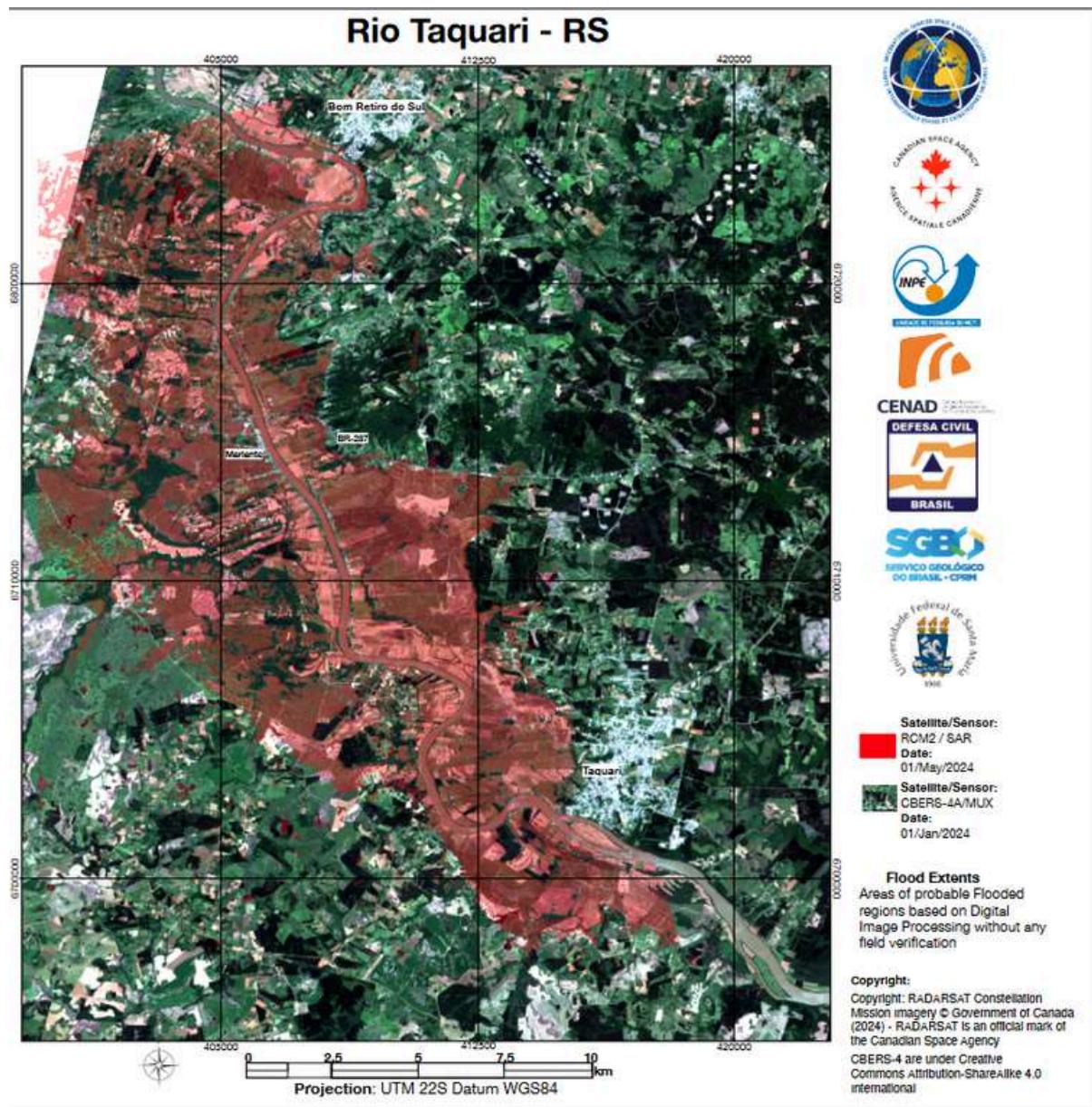
Gráfico 7: Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Taquari - Antas (VIII)



Elaborado pela Autora (2025)

À medida que 689 mil hectares de áreas de transição foram convertidos em zonas instáveis, os impactos hidrológicos se intensificaram, cenário que se evidenciou durante a enchente de 2024. Como resultado, registraram-se: (1) vazões extremamente elevadas, com rios chegando a descarregar até 20 mil metros cúbicos de água por segundo (GZH, 2024); (2) assoreamento acelerado do rio Taquari, especialmente no trecho entre Bom Retiro e Taquari, afetando uma área de aproximadamente 100 km² (**Figura 22**); e (3) formação de "inundação generalizadas" justamente nas áreas com maior crescimento da instabilidade, como nos municípios de Lajeado e Encantado (**Figura 23**).

Figura 22: Extensão da inundação no Vale do Taquari no Rio Grande do Sul



Fonte: Imagem: DIOTG/INPE. Disponível em:
<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/05/imagem-de-satelite-revela-extensao-da-inundacao-no-vale-do-taquari-no-rio-grande-do-sul>

Figura 23: Área inundada no município de Encantado, no Vale do Taquari



Fonte: Imagem: Jefferson Botega / Agencia RBS. Disponível em:
<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2023/09/especialista-explica-fatores-que-fizeram-rio-taquari-subir-rapidamente-e-de-forma-devastadora-clm87vacb000r0136hm3e4b28.htm>

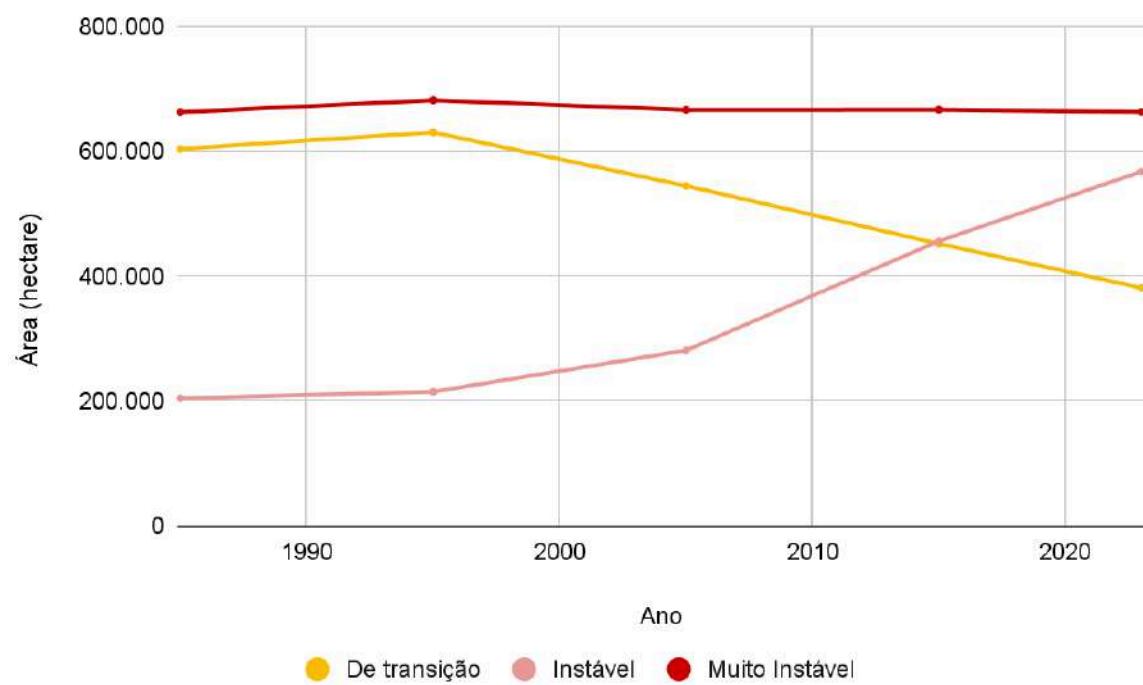
Nesse contexto, o Gráfico 7 revela que, antes mesmo das chuvas extremas de 2024, 78% do território da bacia já apresentava condições de instabilidade. Nota-se como já discutido por Ross (1990), fatores como o desmatamento, a agricultura intensiva e a construção de infraestruturas sem a adoção de critérios ambientais adequados às particularidades da região aprofundam a instabilidade natural das paisagens, comprometendo seu equilíbrio morfodinâmico. Isso explica por que as enchentes tiveram proporções tão devastadoras: o ambiente, já degradado e ocupado, perdeu sua capacidade natural de absorver e regular o volume das águas, fazendo com que um evento climático intenso se transformasse em uma catástrofe anunciada.

Ademais, ao retornar aos dados do Gráfico 6 e Tabela 8 revelam um padrão preocupante: enquanto a classe 'Muito Instável' se manteve relativamente constante (variações $<\pm 1,5\%$), indicando uma estagnação nos níveis mais críticos de fragilidade, as

áreas 'Instáveis' apresentaram crescimento explosivo - especialmente no Baixo Jacuí (+177,5%) e Pardo (+115,8%). Essa dinâmica demonstra que, embora os piores estágios de degradação pareçam estabilizados, o processo de fragilização ambiental está de fato acelerando, com conversão de áreas anteriormente de transição para condições instáveis de risco, marcadas pela crescente configuração do uso antrópico do território ao longo dos anos na RHG.

Este padrão se materializa claramente na sub-bacia do Baixo Jacuí, onde o presente estudo identificou uma perda de 222.708 ha. (-36,8%) de áreas de transição entre 1985-2023 (Gráfico 8). Além disso, tendo o Rio Jacuí como principal afluente na região, a substituição de matas ciliares nas planícies fluviais por lavouras e pastagens eliminou justamente os ecossistemas que atuavam como amortecedores hidrológicos, explicando a rápida transição para classes de maior instabilidade na região.

Gráfico 8: Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Baixo Jacuí (III)



Elaborado pela Autora (2025)

É importante enfatizar que tais zonas já possuem uma condição agravada por sua condição natural (**Figura 13**), tais como solos do tipo Argissolo, o relevo predominantemente

plano e a localização em uma área de depressão geográfica são fatores que, em conjunto, limitam a absorção da água pelo solo e favorecem o aumento do escoamento superficial. Durante a enchente de 2024, essa fragilidade, tanto potencial e emergente ficou evidente. Por receber os fluxos acumulados das áreas de cabeceira mais altas, a sub-bacia do Baixo Jacuí apresenta maior dificuldade de infiltração e maior propensão à erosão ao longo do percurso das águas. Como o caso de Cachoeira do Sul (**Figura 24**) pelo qual registrou durante o evento, a maior enchente de sua história, com o Rio Jacuí chegando a 29,55 metros, cerca de 64% acima do nível normal de 18 metros, ultrapassando o asfalto da Ponte do Fandango (JORNAL DO POVO, 2024).

Figura 24: Área inundada no asfalto da Ponte do Fandango



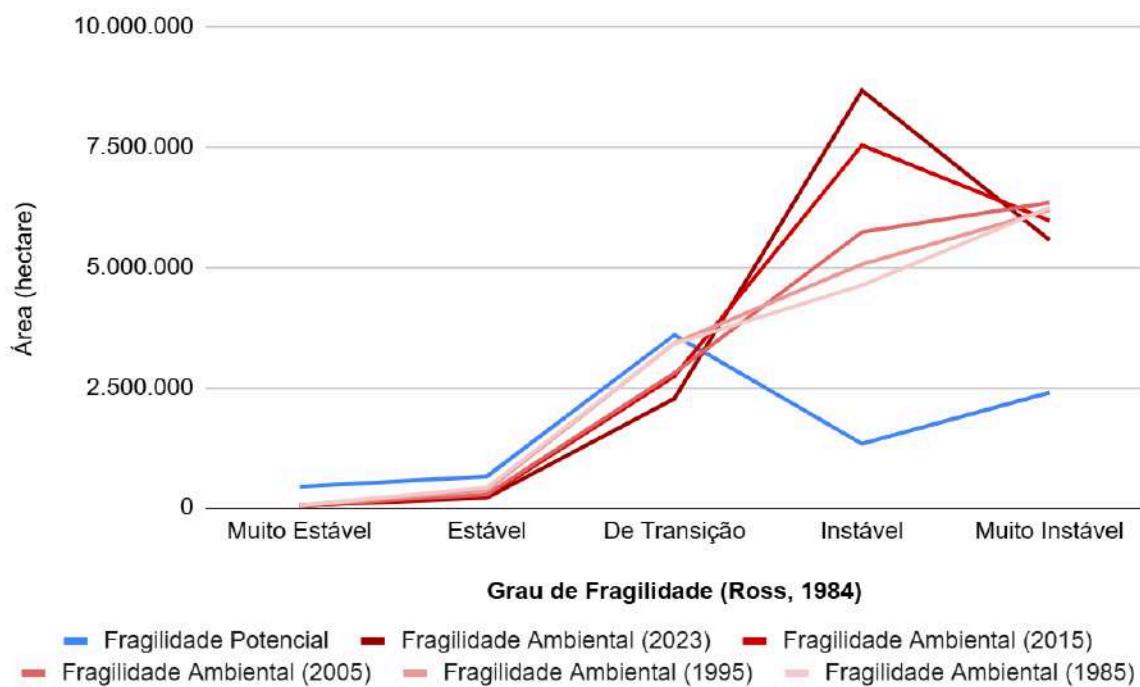
Fonte: Jornal do Povo. Disponível em:

https://www.jornaldopovo.com.br/anuarios/2024/anuario/materias/549/maior_enchente_da_historia.htm

Nesse sentido, esta pesquisa corrobora ao estudo de Ross (1990; 1994) ao demonstrar, através da análise comparativa entre fragilidade potencial e ambiental na RHG, como a interação entre suscetibilidade natural e pressões antrópicas opera na prática. Os dados do Gráfico 9 revelam um padrão alarmante: enquanto as classes naturais 'Muito Estável' e 'Estável' representavam respectivamente 434.658 hectares e 652.386 ha. no cenário potencial, em 2023 essas áreas se reduziram para meros 44.086 hectares (-89,8%) e 206.660 hectares

(-68,3%). O inverso se verifica nas classes críticas - a área 'Instável', que deveria ocupar 1.330.460 hectares segundo o potencial natural, saltou para 8.676.472 hectares (552% acima do esperado), configurando uma inversão completa do perfil ambiental da bacia.

Gráfico 9: Comparativo entre os valores de Fragilidade Potencial e Fragilidade Ambiental dos anos de 1985 a 2023.



Elaborado pela Autora (2025)

Os dados revelam que a ocupação do território na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba excedeu a capacidade de resiliência dos ecossistemas, sobretudo em áreas naturalmente vulneráveis. A redução de 36,9% nas zonas de transição entre 1985 e 2023, aliada à substituição da cobertura vegetal por arrozais e áreas urbanizadas em planícies fluviais e encostas íngremes, intensificou os impactos das chuvas extremas de 2024 ao aumentar significativamente o escoamento superficial. Essa dinâmica evidencia a inadequação dos modelos tradicionais de gestão, que, como mencionado anteriormente, desconsideraram a evolução espaço-temporal da fragilidade ambiental e ignoram — conforme já alertava Ross (1990) — a necessidade de planejamento baseado na estabilidade morfodinâmica, princípio ainda negligenciado na RHG.

A fragilidade ambiental não ocorre de forma isolada, mas como parte de um sistema dinâmico e interconectado. A cartografia desenvolvida neste estudo comprova que a erosão não é um evento pontual, e sim a expressão de processos hidrogeomorfológicos complexos. Quando um trecho do canal fluvial sofre erosão, há alterações não apenas no escoamento local, mas em toda a rede de drenagem, provocando efeitos que se propagam a montante. De modo geral, a dinâmica do relevo, a composição dos solos e o regime hidrológico têm sido profundamente transformados pelas ações humanas. Essa degradação ambiental não apenas modifica a paisagem original e compromete suas funções naturais, como também desencadeia novos processos morfodinâmicos (ROSS, 1990).

Os resultados demonstram que o uso antrópico do solo intensificou em 2,3 vezes a fragilidade natural do sistema, acelerando processos erosivos e elevando a suscetibilidade a inundações. Esse cenário de colapso ecológico progressivo exige intervenções urgentes, pautadas em uma visão integrada da bacia como um sistema dinâmico. A gestão territorial, portanto, não pode se limitar a abordagens fragmentadas; deve considerar as interações entre processos naturais e ações humanas, assegurando a resiliência do ecossistema. Somente assim será possível reverter a crescente degradação e garantir a sustentabilidade hidrogeomorfológica da bacia.

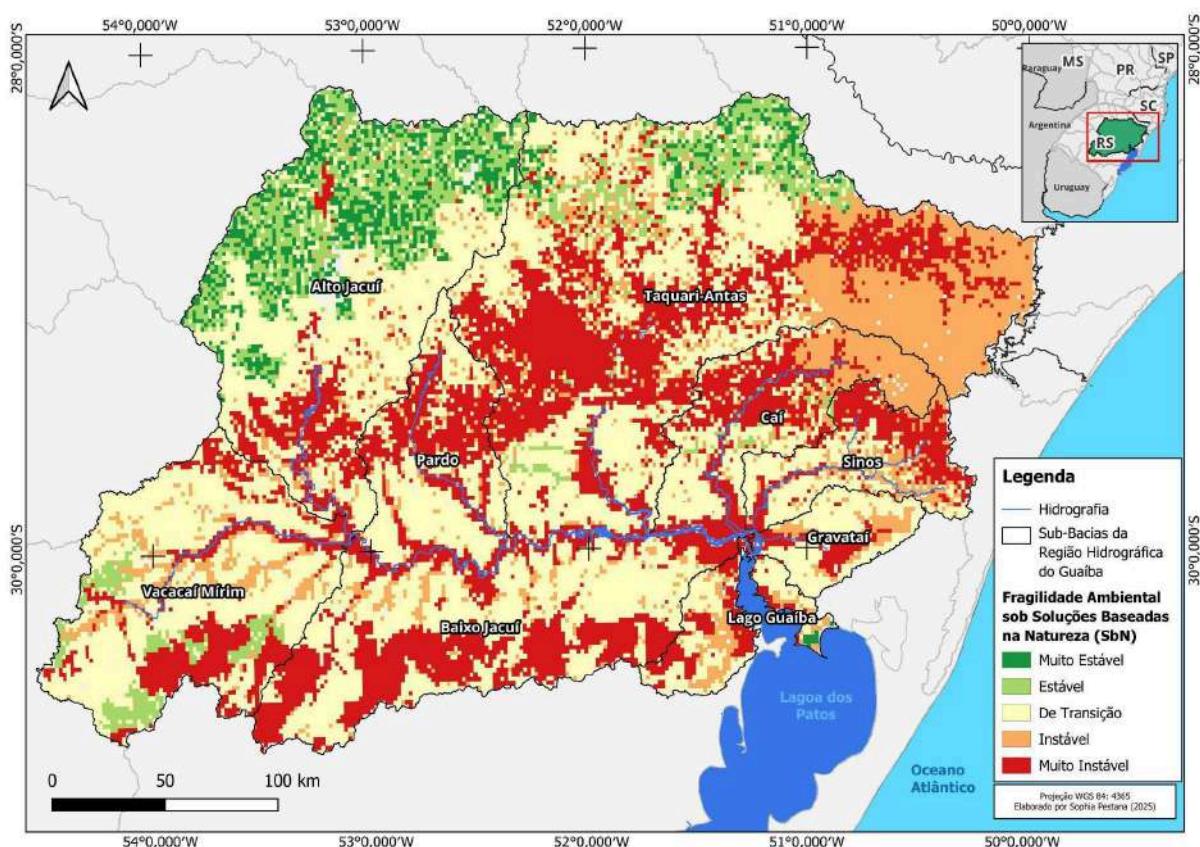
5.3. Fragilidade Ambiental sob SbN na RHG

As enchentes que atingiram o Rio Grande do Sul em maio de 2024, evidenciaram não apenas os efeitos extremos de eventos meteorológicos, mas também a fragilidade potencial à erosão na RHG – marcada por declividades acentuadas e solos de baixa capacidade de infiltração. Por sua vez, a intensificação dos impactos, contudo, decorre de décadas de ocupação inadequada do território, com expansão urbana desordenada e práticas agrícolas que expõe sua fragilidade ambiental.

Diante desse cenário, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) configuram-se como estratégias fundamentadas em abordagens ecossistêmicas para a redução de riscos de desastres, conforme destaca Marques (2021, pg. 21). Alinhada a esse referencial, como uma adaptabilidade do trabalho desenvolvido por Ross (1990;1994), a presente pesquisa simulou um cenário de restauração florestal na RHG, com o objetivo de analisar os efeitos dos meios estáveis (TRICART, 1997) sobre os níveis de fragilidade ambiental na região. Dessa forma, a transição de áreas degradadas para áreas restauradas revelou, como apresentado na **Figura**

25, uma redução visualmente significativa de áreas com instabilidades ao comparar com os resultados da fragilidade ambiental para os anos de 1985 a 2023.

Figura 25: Mapa da Fragilidade Ambiental sob SbNs

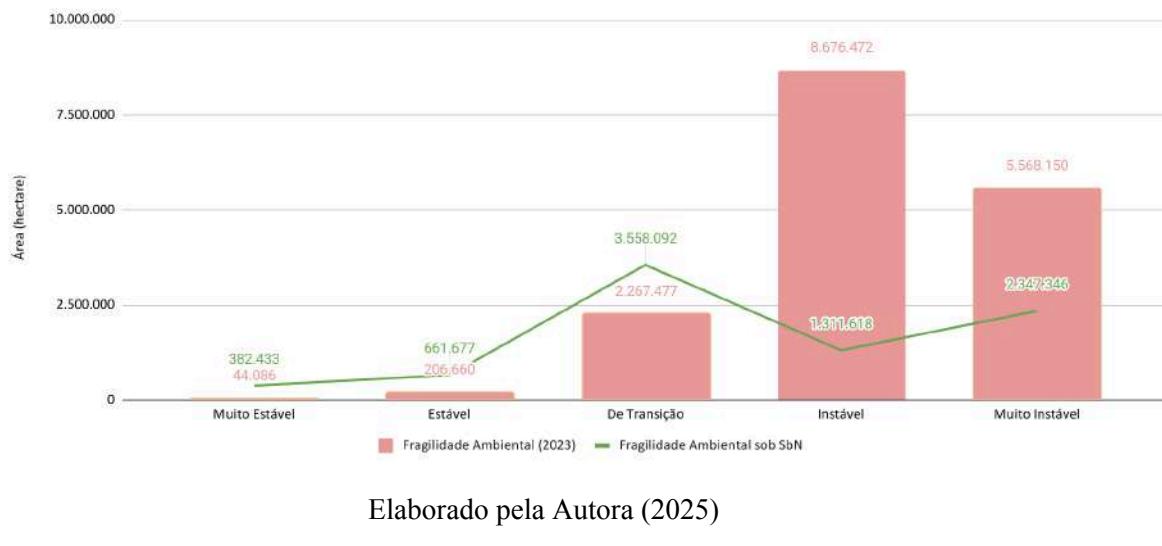


Elaborado pela Autora (2025)

A adoção de Soluções baseadas na Natureza (SbN), como o reflorestamento, demonstra impactos significativos na estabilidade ambiental, conforme evidenciado pela comparação entre os cenários de fragilidade ambiental em 2023 e sob intervenção de SbN (Gráfico 10). No cenário original, apenas 1,5% das áreas eram classificadas como "Muito Estáveis" ou "Estáveis" (44.086 e 206.660 hectares, respectivamente), enquanto 85% encontravam-se em condições de transição, instabilidade ou alta instabilidade (2.267.477, 8.676.472 e 5.568.150 hectares). Com a aplicação de SbN, observa-se um aumento expressivo nas áreas estáveis, com "Muito Estáveis" subindo 767% (382.433 hectares) e "Estáveis" aumentando 220% (661.677 hectares), enquanto as zonas "Instáveis" e "Muito Instáveis" reduziram-se em 85% (1.311.618 hectares) e 58% (2.347.346 hectares), respectivamente. Entretanto, há um crescimento de 57% nas zonas em transição sugerindo

que, apesar de parte das áreas instáveis terem sido recuperadas para um estado menos crítico, sua capacidade de regulação hídrica e infiltração de água permanece limitada.

Gráfico 10: Comparação entre a distribuição por área em hectare da Fragilidade Ambiental sob Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e a Fragilidade Ambiental em 2023 na RHG



Vale ressaltar que apesar da implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e os benefícios que ela impõe, ainda persistem desafios expressivos: cerca de 6.471.559 hectares — o equivalente a 76,2% da Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) — permanecem classificados como áreas “De Transição”, “Instáveis” ou “Muito Instáveis”. Essa persistência evidencia que a fragilidade ambiental na RHG não está apenas relacionada à ausência de cobertura vegetal, mas também às características naturais consolidadas do território, como relevo e o tipo de solo.

A Área de Proteção Ambiental do Delta do Jacuí (APADJ) exemplifica os limites impostos pelas características naturais do território. Instituído pela Lei Estadual nº 12.371/2005 e regulamentado pelos Decretos Estaduais nº 44.516, de 29 de junho de 2006 e nº 44.754, de 24 de novembro de 2006, com aproximadamente 14.242 hectares de vegetação preservada, essa unidade de conservação foi criada para proteger a biodiversidade, manter áreas verdes e atuar como um filtro natural junto à malha urbana. No entanto, apesar de área preservada aos limites da ecodinâmica em seu estado natural (ROSS, 1994) e do grau de proteção legal, a região foi severamente impactada pelas enchentes de 2024 (**Figura 26**). Esse fato reforça uma das principais síntese da pesquisa: mesmo áreas inteiramente vegetadas

podem continuar vulneráveis à instabilidade ambiental, como a erosão, quando inseridas em contextos físicos naturalmente predispostos à fragilidade.

Figura 26: Área inundada ao entorno da Área de Proteção Ambiental do Delta do Jacuí



Fonte: Foto:

Reprodução/MetSul/Xhttps://www.brasildefato.com.br/2024/05/06/metsul-divulga-fotos-de-a
ntes-e-depois-da-enchente-na-regiao-metropolitana-de-porto-alegre/

Nesse sentido, a análise comparativa entre a fragilidade potencial e o cenário simulado com base nas Soluções Baseadas na Natureza (SbN), apresentada na **Tabela 9**, confirma essa interpretação. Em geral, as diferenças entre os dois modelos foram inferiores a 2% com exceção da classe “Muito Estável”, que apresentou uma redução de 12%. As categorias “De Transição”, “Instável” e “Muito Instável” apresentaram retrações modestas, somando uma redução total de aproximadamente 99.526 hectares nas zonas mais suscetíveis à degradação. Essa diminuição, embora pequena, é significativa do ponto de vista ambiental, pois sugere que as SbN contribuíram para conter a expansão da instabilidade em áreas de risco, promovendo uma reclassificação positiva — ainda que sutil — em direção a faixas de menor fragilidade.

Tabela 9: Análise de tendência de Fragilidade Potencial e Fragilidade Ambiental sob Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

Categoria	Fragilidade Potencial (ha.)	Fragilidade sob SbN (ha.)	Variação Absoluta (ha)	Variação Percentual (%)
Muito Estável	434.658	382.433	-52.225	-12,0
Estável	652.386	661.677	+9.291	+1,4
De Transição	3.593.278	3.558.092	-35.186	-1,0
Instável	1.330.460	1.311.618	-18.842	-1,4
Muito Instável	2.392.844	2.347.346	-45.498	-1,9

Elaborado pela Autora (2025)

Por outro lado, a categoria “Estável” foi a única a apresentar crescimento, com um aumento de 1,4% (9.291 hectares), o que pode indicar um reforço da resiliência em áreas que já apresentavam condições favoráveis, mas ainda não eram plenamente classificadas como estáveis. No entanto, essa tendência positiva não elimina a necessidade de estratégias complementares. As particularidades físicas da região — como declividades acentuadas e solos de maior susceptibilidade a erosão — exigem que as SbN sejam associadas a técnicas adaptativas específicas, como o uso de espécies vegetais com raízes profundas em encostas íngremes e a restauração de áreas de preservação permanentes (APP) em planícies de inundação.

Nota-se, portanto, que mesmo ao propor cenários de restauração florestal em escala de paisagem, a pesquisa evidencia um ponto crítico: grande parte da população gaúcha ocupa áreas naturalmente predispostas à instabilidade ambiental devido às suas características físicas naturais. Trata-se, portanto, de uma fragilidade anunciada, cuja gravidade poderia ter sido melhor compreendida por meio de diagnósticos ambientais mais criteriosos e articulados ao ordenamento territorial.

A permanência de comunidades em zonas que deveriam ser consideradas de uso restritivo reforça a urgência de que o Estado reveja os atuais padrões de uso e ocupação do solo, sobretudo diante da intensificação dos desastres socioambientais. A adoção de medidas preventivas, aliada a um planejamento territorial eficiente, tem o potencial não apenas de reduzir a vulnerabilidade ambiental no Rio Grande do Sul, mas também de oferecer um modelo replicável para outras regiões que enfrentam os impactos crescentes das mudanças climáticas. Como cita o professor Jurandyr Ross:

“No ambiente, como na questão da saúde, é preciso ter uma postura mais voltada para o preventivo do que para o corretivo. Da mesma maneira que é mais fácil e mais econômico previne-se das doenças do que curá-las, na natureza certamente é bem menor o custo da prevenção de acidentes ecológicos e da degradação generalizada do ambiente, do que corrigir e recuperar o quadro ambiental deteriorado; mesmo porque determinados recursos naturais uma vez deteriorado ou má-utilizados torna-se irrecuperáveis” (ROSS, 1990, pg. 17).

Assim, na ausência de medidas preventivas, a mudança no grau de estabilidade do ecossistema intensifica os impactos da dinâmica fluvial. Enchentes e inundações, por exemplo, resultam do aumento do escoamento superficial provocado por essa instabilidade, sendo agravadas pelo comportamento dos rios — especialmente o Rio Jacuí — que têm apresentado elevações anormais no nível da água e na vazão. Esses eventos, observados recentemente no Rio Grande do Sul, refletem um cenário de mudanças climáticas em que a frequência e a intensidade das chuvas já não seguem mais os padrões históricos, contribuindo também para o avanço dos processos erosivos.

6. CONCLUSÃO

A geografia, e em especial a geomorfologia, desempenha um papel fundamental para compreender as enchentes que atingiram o Rio Grande do Sul em 2024. A relação entre a dinâmica do relevo e os eventos hidrológicos extremos evidencia como o entendimento do espaço geográfico é essencial para interpretar a origem e a amplificação desses desastres. Nesse contexto, não se trata apenas de propor um zoneamento territorial, mas sim de articular esse zoneamento a um planejamento mais amplo e integrado.

Conforme demonstrado pelos estudos de fragilidade ambiental na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG), a consolidação de ocupações humanas em áreas naturalmente vulneráveis - particularmente em várzeas e zonas de transição entre cabeceiras de drenagem e cursos fluviais inferiores - criou um cenário de risco sistêmico. Enquanto 86,2% da RHG apresentava instabilidade potencial em condições naturais, a incorporação das áreas antropizadas elevou esse índice para 98,5% em 2023. Essa inadequada ocupação do espaço, somada à crescente intensificação dos extremos climáticos, potencializa exponencialmente a vulnerabilidade socioambiental, demandando intervenções urgentes, como o reflorestamento das matas ciliares ao longo do Rio Jacuí e de seus afluentes, além do fortalecimento de políticas públicas que ampliem o acesso à informação e à participação das comunidades em ações de adaptação e mitigação.

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) emergem, nesse contexto, como uma estratégia promissora – ainda que não autossuficiente – para mitigar a degradação ambiental. Os dados analisados revelam sua eficácia na estabilização de áreas vulneráveis: entre 2023 e a reclassificação estudada, as zonas classificadas como "Muito Estáveis" apresentaram incremento de 767% (382.433 ha.), enquanto as "Estáveis" aumentaram 220% (661.677 ha.). Paralelamente, observou-se redução de 85% (1.311.618 ha.) e 58% (2.347.346 ha.) nas áreas "Instáveis" e "Muito Instáveis", respectivamente. Tais intervenções se mostram eficazes na restauração de processos ecológicos-chave, como recarga hídrica, controle erosivo e regulação de fluxos, ampliando a resiliência ecológica frente a extremos climáticos. Contudo, sua efetividade é condicionada pelas características geomorfológicas locais: em áreas com alta susceptibilidade natural à instabilidade, as SbN exigem complementação com medidas estruturais e um planejamento territorial sistêmico para alcançar impactos significativos.

A pesquisa revela que a persistência de ocupações humanas em áreas de alto risco - mesmo em cenários de restauração florestal - configura uma verdadeira "tragédia anunciada",

na qual os desastres recorrentes por chuvas extremas representam a materialização de riscos sistematicamente negligenciados. Essa realidade atinge com maior gravidade a população mais vulnerável, que historicamente é empurrada para zonas de risco como margens de rios e encostas, onde a perda de vidas, moradias e meios de subsistência não são meros dados estatísticos, mas a expressão concreta de um processo de exclusão territorial que concentra os mais pobres justamente nas áreas de maior instabilidade ambiental (**Figura 27**).

Figura 27: Rua alagada pela enchente no município de Eldorado do Sul



Fonte: Foto: Bruno Peres/Agência Brasil. Disponível em:<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-06/revolta-e-incerteza-marcam-volta-de-alagamentos-em-eldorado-do-sul>

Portanto, o desafio não é apenas técnico ou climático, mas político, estrutural e ético. Enfrentar a crise climática exige mais do que declarações públicas em momentos de calamidade: exige ação contínua, planejamento de longo prazo, fortalecimento das políticas públicas e responsabilização daqueles que, por omissão ou interesse, contribuem para a deterioração do território e o aumento da vulnerabilidade social.

Em síntese, a análise integrada da fragilidade ambiental, dos processos morfodinâmicos e das possibilidades de restauração demonstra que desastres como as

enchentes de 2024 não são meramente "naturais". Eles são, sobretudo, consequência de um modelo histórico de ocupação inadequada do território. Reverter esse cenário exige políticas públicas embasadas em ciência, capazes de conciliar prevenção, planejamento e intervenções adaptadas à realidade ecológica de cada região, evitando que tragédias previsíveis continuem a se repetir.

7. REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas.** São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. Disponível em: https://avauea.uea.edu.br/pluginfile.php/275784/mod_resource/content/3/ABS%C3%81BER%2C%20Aziz%20Os%20Dom%C3%ADnios%20de%20Natureza%20no%20Brasil_2.pdf. Acesso em: 5 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente.** Brasília, DF, 2025. 57 p.: il. ISBN 978-65-88101-73-5.

ALOSCIOUS, A. A.; ARTUSO, M.; TORABI MOGHADAM, S. **Nature-based solutions for flood mitigation: the case study of Kochi.** Sustainability, Basel, v. 17, n. 5, p. 1983, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17051983>. Acesso em: 5 jul. 2025.

CARVALHO, Celso Santos; MACEDO, Eduardo Soares de; OGURA, Agostinho Tadashi (orgs.). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.** Brasília: Ministério das Cidades; São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p. ISBN 978-85-60133-81-9. Disponível em: <http://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/185>. Acesso em: 5 jul. 2025.

CEPED, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2013. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012.** 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2024/08/RIOGRANDEDOSUL_mioloWEB.pdf. Acesso em: 30 dez. 2024.

CHRISTOFOLLETTI, Antonio. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 2º Edição, 1980.

DE CONINCK, H., A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong, J. Ford, S. Fuss, J.-C. Hourcade, D. Ley, R. Mechler, P. Newman, A. Revokatova, S. Schultz, L. Steg, and T. Sugiyama, 2018: **Strengthening and Implementing the Global Response.** In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 313-444. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.006>.

G1. Área de preservação ambiental no RS está abandonada desde a enchente de maio.
G1, Rio Grande do Sul, 25 jan. 2025. Disponível em:

<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2025/01/25/area-de-preservacao-ambiental-no-rs-esta-abandonada-desde-a-enchente-de-maio.ghtml>. Acesso em: 5 jul. 2025.

GUERRA, A. J. T; JORGE, M.C.T. **Degradação dos solos no Brasil**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2014.

HORN, Lara; TORNELLO, Vitor Tramontin; ARIOLI, Magdala; CORRÊA, Fernando; AZEREDO, Laura. **Acelerando Soluções Baseadas na Natureza em Cidades Brasileiras: Lições aprendidas na estruturação de projetos em estágio de ideação**. Nota Prática. São Paulo: WRI Brasil, 2024. Disponível online em: <https://doi.org/10.46830/wripn.23.00103>.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH / UFRGS. **Mapa da inundação da região metropolitana de Porto Alegre**. Porto Alegre: UFRGS, mai. 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/mapa-da-inundacao-da-regiao-metropolitana-de-porto-alegre/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

KAWAKUBO, Fernando Shinji et al. **Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 12, n. 16, p. 2203-2210, 2005. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.16.10/doc/2203.pdf>. Acessado em: 30 de Dezembro de 2024.

LINO, João. **Metodologia baseada nas relações intensidade-duração-frequência para retroanálise e monitoramento em tempo real de chuvas intensas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344227919_METODOLOGIA_BASEADA_NAS_RELACOES_INTENSIDADE-DURACAO_FREQUENCIA_PARA_RETROANALISE_E_MONITORAMENTO_EM_TEMPO_REAL_DE_CHUVAS_INTENSAS. Acesso em: 5 jul. 2025.

LUZ, R. A.; RODRIGUES, C. **O processo histórico de ocupação e de ocorrência de enchentes na planície fluvial do rio Pinheiros de 1930 até os dias atuais**. Geousp – Espaço e Tempo (On-line), v. 24, n. 2, p. 340-360, ago. 2020. ISSN 2179-0892. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2021/08/164499-Texto-do-artigo-429069-3-10-20200827.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2024.

MAPBIOMAS. **Legenda Coleção 9 - Descrição Detalhada**. MapBiomas, Brasil, 2024.

MARQUES, Taícia Helena Negrin; RIZZI, Daniela; FERRAZ, Victor; HERZOG, Cecilia Polacow. **Soluções baseadas na natureza: conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru**. Revista LABVERDE, São Paulo, Brasil, v. 11, n. 1, p. 12–49, 2021. DOI: 10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189419. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/189419..> Acesso em: 9 jul. 2025.

MET SUL METEOROLOGIA. Enchente supera a de 1941 e se torna a maior da história de Porto Alegre. Metsul, Porto Alegre, 4 maio 2024. Disponível em: <https://metsul.com/enchente-supera-a-de-1941-e-se-torna-a-maior-da-historia-de-porto-alegre/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

OLIVEIRA, Milena de. Soluções baseadas na natureza como elemento integrador entre projetos de drenagem urbana e plano do clima na cidade de São Paulo. 2023. 125 f. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho – UNINOVE, São Paulo, 2023. Orientadora: Profª Drª Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo. Disponível em: <https://bibliotecade.uninove.br/bitstream/tede/3170/2/Milena%20de%20Oliveira.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2025.

PIMENTEL, Thiago Borini. Fragilidade potencial e emergente do relevo de Vitória–ES: subsídios para gestão de riscos e desastres em ambiente urbano. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019. Disponível em: <https://geo.ufes.br/sites/geografia.ufes.br/files/field/anexo/borini.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul. 8. ed., atual. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, novembro de 2024. ISBN 978-65-01-24580-5. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>. Acesso em: 5 jul. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Boletins sobre o impacto das chuvas no RS. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/boletins-sobre-o-impacto-das-chuvas>. Acesso em: 30 dez. 2024.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Revista do Departamento de Geografia, n. 8 , p. 63-74, 1994. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000873908>. Acesso em: 05 jul. 2025.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Geomorfologia, ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto, 1990. 85 p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000815805>. Acesso em: 5 jul. 2025.

RUCUKERT, Aldomar Arnaldo et al. A tragédia climática no Rio Grande do Sul em 2024. Anotações sobre uma catástrofe anunciada. Geografafares, Vitória, Brasil, v. 4, n. 39, 2024. DOI: 10.47456/geo.v4i39.46646. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/geografafares/article/view/46646>.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos, et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4. Disponível

em:

<https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2025.

SUL21. Estudo do IPH monitora contaminação do Guaíba e risco de doenças causadas pelas enchentes. Sul21, Porto Alegre, 10 jun. 2024. Disponível em: <https://sul21.com.br/noticias/geral/2024/06/estudo-do-iph-monitora-contaminacao-do-guaiba-e-risco-de-doencas-causadas-pelas-enchentes/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

TOMINAGA, L. K.; Santoro, J.; Amaral, R. do (orgs.). 2009. Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico. 196 p. ISBN 978-85-87235-09-1. Disponível em:

https://www.infraestruturaeambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf. Acesso em: 5 jul. 2025.

TRICART, Jean. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE, SUPREN, 1977. 97 p.

VALENTE, Pedro Teixeira. Histórico e prognóstico de enchentes no Rio Grande do Sul. Esquerda Online, Porto Alegre, 21 maio 2024. Disponível em: <https://esquerdaonline.com.br/2024/05/21/historico-e-prognostico-de-enchentes-no-rio-grande-do-sul/>. Acesso em: 30 dez. 2024.

WEILKIENS, Tim. Introduction. In: WEILKIENS, Tim (ed.). **Systems Engineering with SysML/UML.** Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2007. p. 1-22. (The MK/OMG Press). ISBN 9780123742742. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374274-2.00001-8>.

WILHELM, Martiele; WEISS, Raquel. Paisagem e sensibilidade ecológica na Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba/RS: uma análise das dinâmicas presentes nas bacias do Alto Jacuí, Baixo Jacuí, Pardo e Vacacaí-Vacacaí Mirim. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n. 44, p. 8–37, 2024.

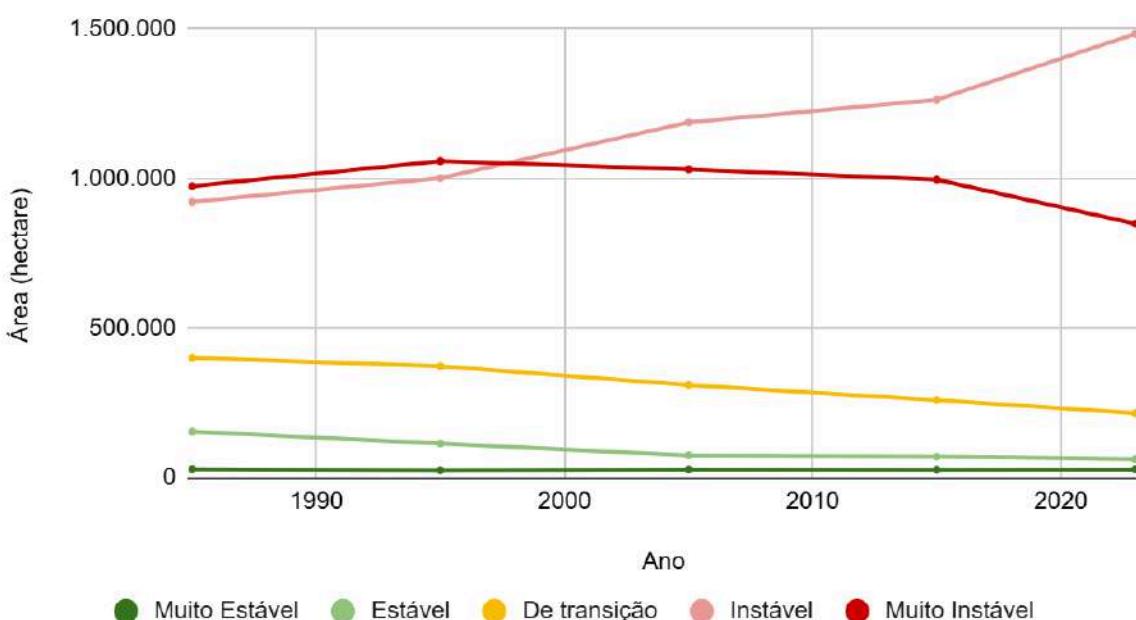
WOLLMANN, Cássio Arthur. Revisão teórico-conceitual do estudo das enchentes nas linhas de pesquisa da geografia física. Revista Eletrônica Geoaraguaia, Barra do Garças-MT, v. 5, n. 1, p. 27-45, jan./jul. 2015. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/4914/pdf>. Acesso em: 5 jul. 2025.

APÊNDICE A - GRÁFICOS COMPLEMENTARES

O referente apêndice reúne os gráficos complementares à análise das classes de fragilidade ambiental nas sub-bacias da Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (RHG). A seguir, são apresentados os padrões espaciais e temporais de estabilidade e instabilidade ambiental para os anos analisados, com destaque para a comparação entre 1985 e 2023. Essa perspectiva gráfica permite evidenciar as tendências de transformação do território, influenciadas por processos como a modernização agrícola e a urbanização generalizada.

Gráfico A.1 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Alto Jacuí

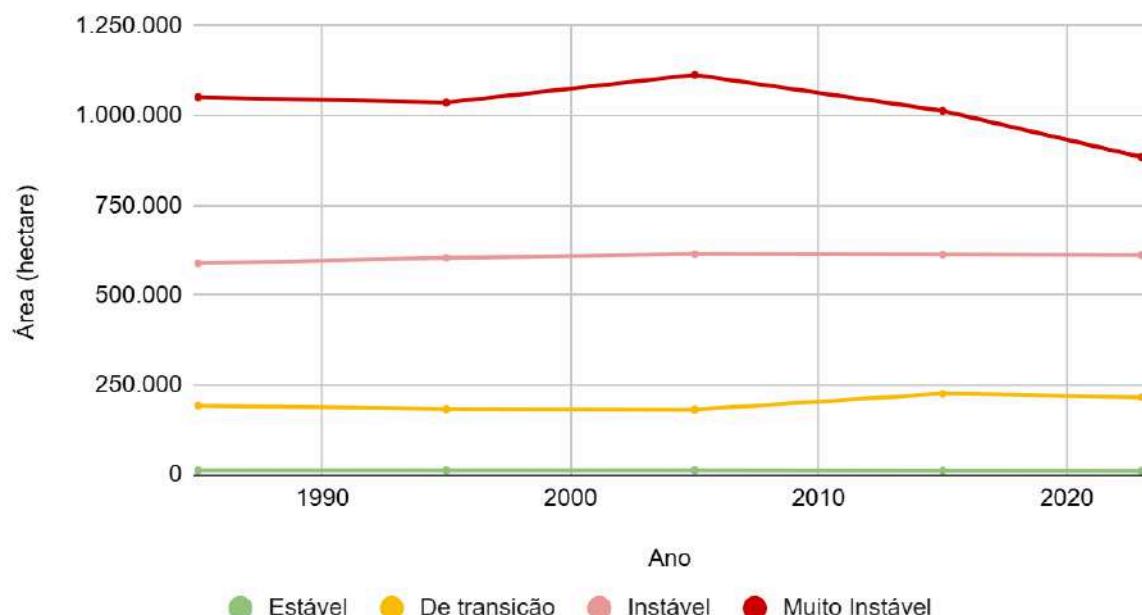
(I) Alto Jacuí



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico A.2 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Caí

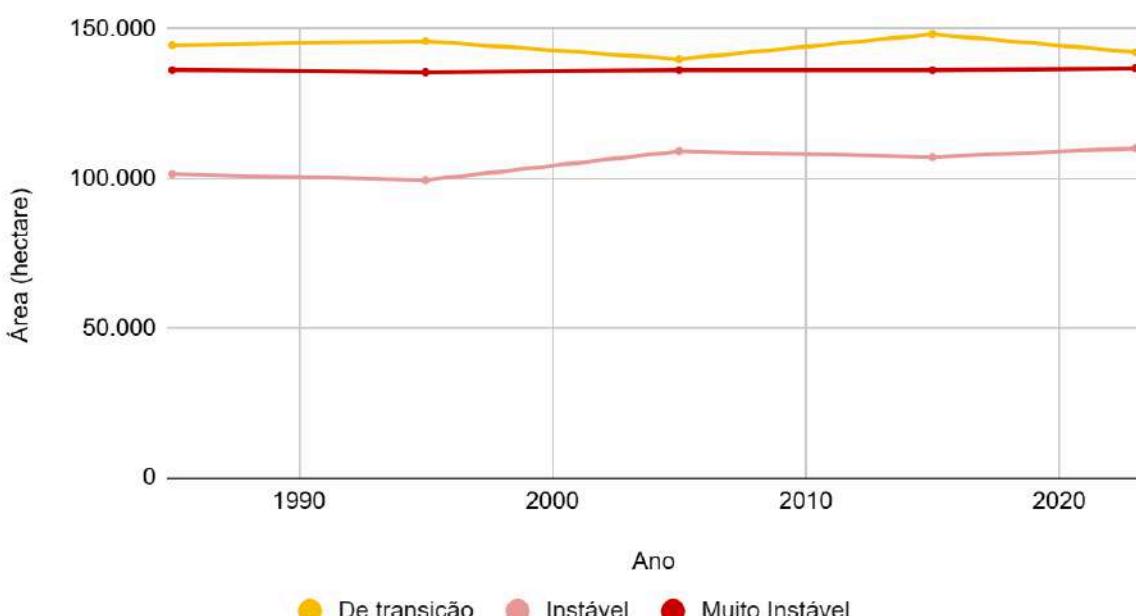
(III) Caí



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico A.3 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Gravataí

(IV) Gravataí



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico A.4 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Lago Guaíba

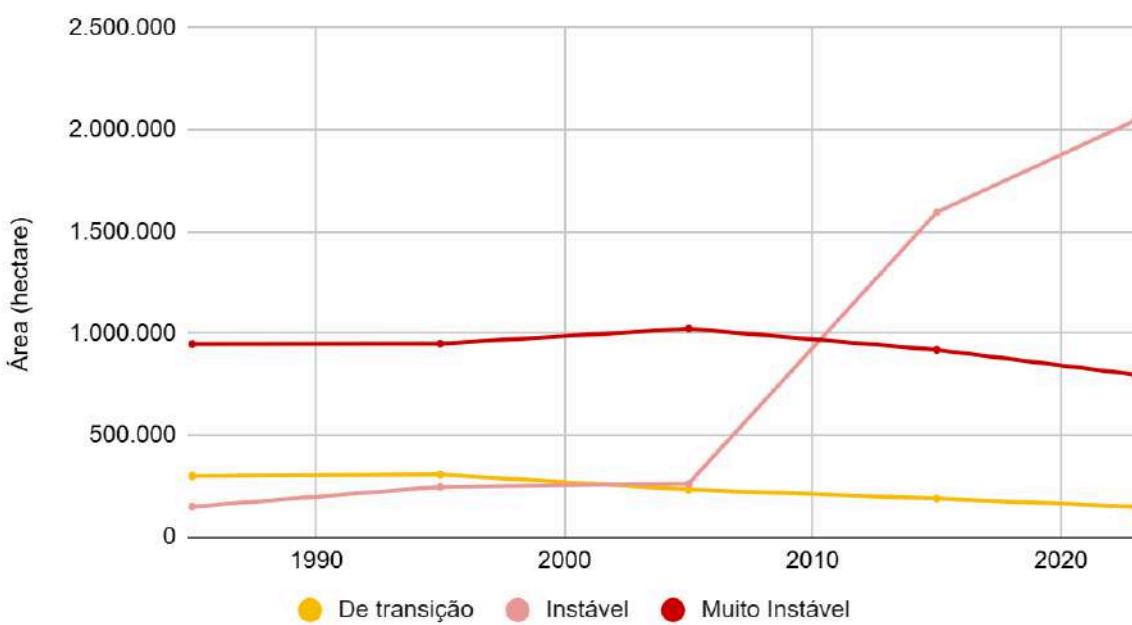
(V) Lago Guaíba



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico A.5 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Pardo

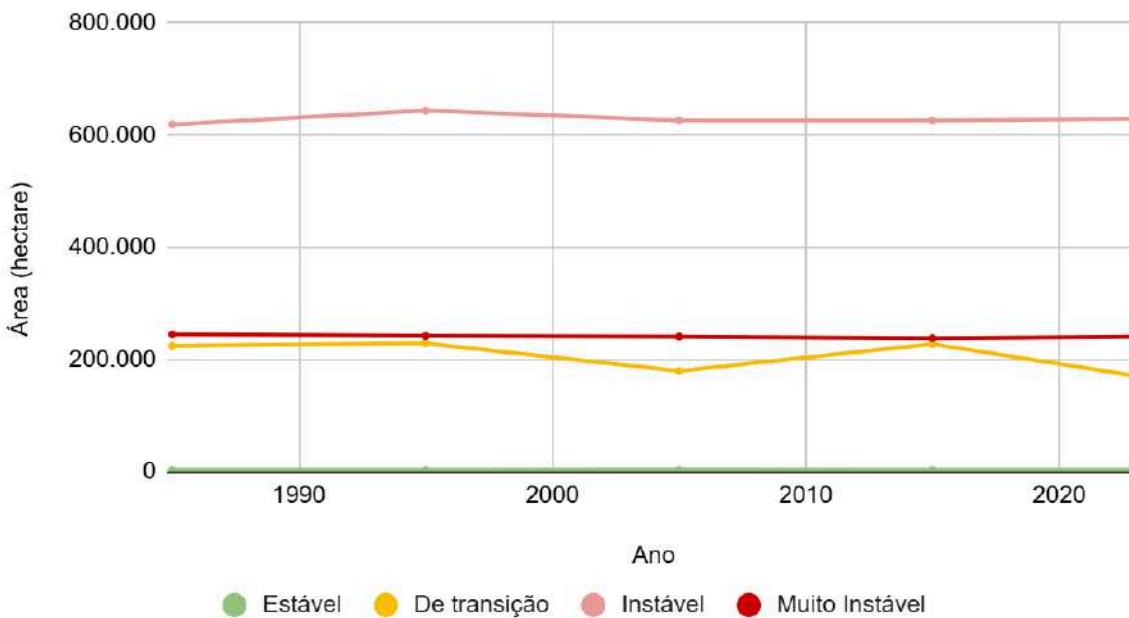
(VI) Pardo



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico A.6 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Sinos

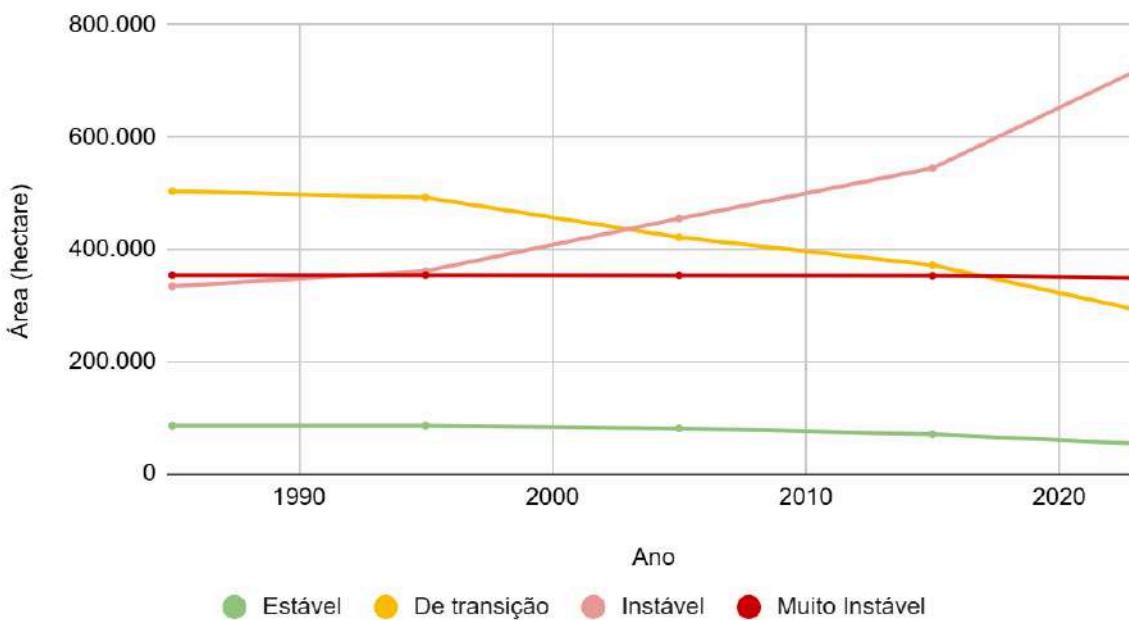
(VII) Sinos



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico A.7 – Distribuição temporal por área em hectare da Fragilidade Ambiental na sub-bacia Vacacaí Mirim

(IX) Vacacaí - Mirim



Fonte: Elaboração própria.

