



RS

REFLEXÕES PARA A
RECONSTRUÇÃO DO
RIO GRANDE DO SUL

Libretos

RESILIÊNCIA & SUSTENTABILIDADE



Copyright @ 2025, João Ferrer
Copyright @ 2025, Marcelo Danéris
Copyright @ 2025, Pedro Romero Marques

APOIO
**OPEN SOCIETY
FOUNDATIONS**



SECRETARIA PARA
**APOIO À RECONSTRUÇÃO DO
RIO GRANDE DO SUL**





RS: RESILIÊNCIA & SUSTENTABILIDADE

REFLEXÕES PARA A RECONSTRUÇÃO
DO RIO GRANDE DO SUL

Organizadores

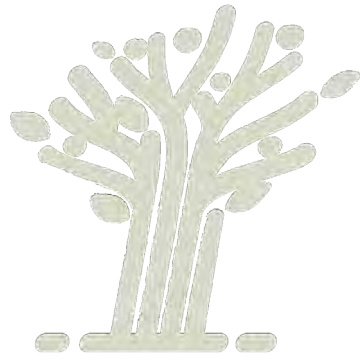
João Ferrer

Marcelo Danéris

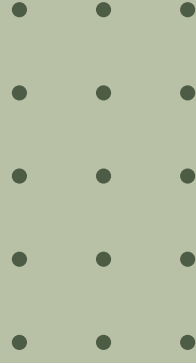
Pedro Romero Marques

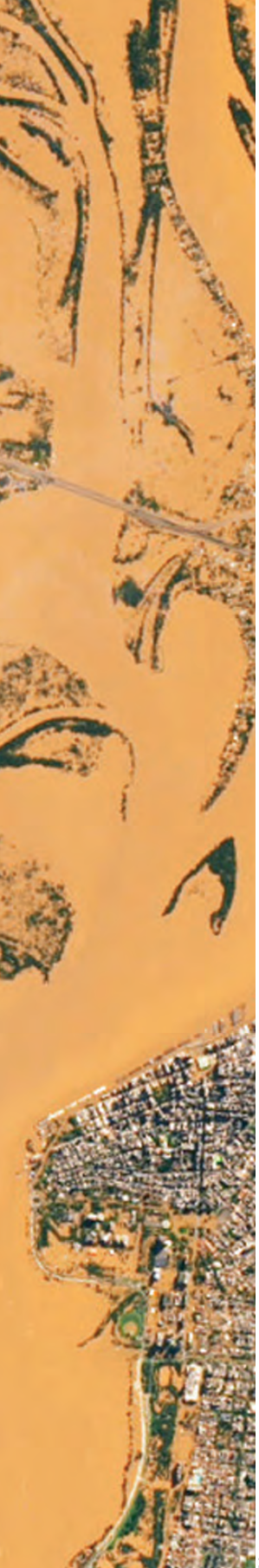
Libretos

2ª EDIÇÃO AMPLIADA
Porto Alegre, 2025



RS: RESILIÊNCIA & SUSTENTABILIDADE





Nasa

O projeto ***RS: Resiliência & Sustentabilidade*** foi promovido por meio de um acordo de cooperação entre a Secretaria Extraordinária de Reconstrução do RS, do Governo Federal e a Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo e contou com o apoio da Open Society Foundations. Os artigos que compõem esta publicação são resultado de estudos desenvolvidos no âmbito das universidades federais com sede no Rio Grande do Sul e de inteira responsabilidade dos autores, não expressando a opinião dos organizadores, bem como das entidades e instituições promotoras e apoiadoras do projeto.





SUMÁRIO

Apresentação	9
---------------------	----------

Prefácio

Clima: a nova fronteira da interconexão humana com a Terra no Antropoceno	21
--	-----------

Rualdo Menegat

A cheia de 2024 no Rio Grande do Sul	47
---	-----------

Fernando Mainardi Fan, Walter Collischonn,
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Anderson Ruhoff

Avaliação dos impactos das enchentes de maio de 2024 em variáveis econômicas e sociais dos municípios do RS afetados pela mancha de inundação	65
--	-----------

Gibran da Silva Teixeira, Pedro Henrique Soares Leivas,
Vinicius Halmenschlager, Márcio Nora Barbosa, Tatiana Silva da Silva,
Alisson Fiorentin, José Nunes de Aquino

Protocolo de gestão dos territórios sanitários temporários integrado (PTSTI) para resiliência do sistema de saúde nos desastres	89
--	-----------

Abner W. Q. Freitas, Ana Mariane Marques Barroso,
Lorena Maria de Oliveira Barbosa, Lucia Campos Pellanda

Diagnóstico da aptidão agrícola das terras e fertilidade do solo em áreas agrícolas atingidas por desastres climáticos na Serra Gaúcha	111
---	------------

Gustavo Brunetto, Allan Augusto Kokkonen, Ana Luiza Lima Marques,
Laura Silva Dunker, Bruna Trevizan Paese, Jean Michel Moura-Bueno,
Douglas Luiz Grando, Lucas Peranzoni Deponti,
Samuel Schemmer, Bruno Ehle de Souza, Cauan Guerra Martins,
Rian Brondani, Maria Eduarda Costa Reis Araújo, Alex Benetti,
Katriel Pettermann Bertoldo, Lenon Cerentini, André Schröder Buss

Aplicação de um Digital Twin para prognóstico e mitigação dos efeitos da inundação nas cidades às margens da Lagoa dos Patos	133
---	------------

Elisa Helena Fernandes, Glauber Acunha Gonçalves



**Projeto integrado de monitoramento
e previsão climática, hidrológica e geotécnica
para pequenas bacias hidrográficas** 159

Vagner Anabor, Daniel Gustavo Piccilli Allasia, Magnos Baroni

**Inteligência artificial na previsão do tempo
em curto prazo: reduzindo os impactos
de desastres climáticos** 187

Fabício Harter, Leonardo Calvetti,
Elcio Shiguemori, Felipe Copceski Rossatto

**Estrutura produtiva e sustentabilidade:
trajetória e desafios da economia gaúcha
no contexto das mudanças climáticas** 207

Hélio Henkin, Carlos Schönerwald,
Luiza Pecis Valenti, Lisiane de Souza Nunes de Moura

**Estratégias para mitigação das mudanças
climáticas no bioma Pampa** 233

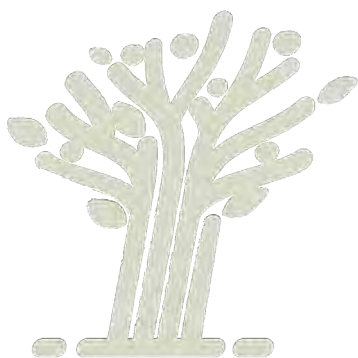
Rafael Cabral Cruz, Igor Poletto, André Carlos Cruz Copetti,
Beatriz Stoll Moraes, Luciana Borba Benetti,
Wellington Bittencourt dos Santos

**Diretrizes do planejamento urbano e regional
para uma transição sociotécnica resiliente
na Região Hidrográfica do Guaíba** 263

Luciana Inês Gomes Miron, Inês Martina Lersch, Ana Elísia da Costa,
Bárbara Giacom, Clarice Misoczky de Oliveira, Eugenia Aumond Kuhn,
Geisa Zanini Rorato, Heleniza Ávila Campos, Júlio Celso Borello Vargas,
Humberto Teixeira Damilano, Isabelle Carolina Mangoni Soares,
Nicole Bueno Leal de Almeida, Ankita Sood

**Adaptação e resiliência a cheias no
Rio Grande do Sul no contexto da variabilidade
e mudança climática** 291

Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Walter Collischonn,
Pedro Torres Miranda, Fernando Mainardi Fan, Anderson Ruhoff



“A região Sul do Brasil tem sido marcada por recorrentes episódios de extremos climáticos, que se alternam entre fortes estiagens e chuvas excessivas.”



APRESENTAÇÃO

As fortes chuvas e inundações ocorridas entre abril e maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul expuseram o rápido e severo impacto que eventos climáticos extremos podem infligir sobre regiões densamente ocupadas, como o Vale do Taquari, o Vale do Rio dos Sinos e a Região Metropolitana de Porto Alegre. Os números da catástrofe, frequentemente retomados ao longo desta publicação, surpreendem ao mostrar a capilaridade desses efeitos, que atingiram residências e estabelecimentos produtivos, romperam redes de infraestrutura e transporte, desestruturaram serviços de saúde e educação e inviabilizaram equipamentos de cultura e de lazer.

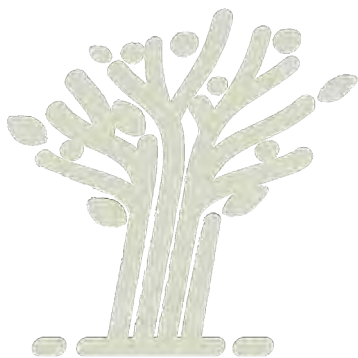
Essas consequências, muitas delas inesperadas e difíceis de serem antecipadas, contribuíram para que, durante alguns dias, as inundações ocorridas no Rio Grande do Sul repercutissem como um dos marcos inaugurais da era das mudanças climáticas no Brasil. Entretanto, não obstante sua particularidade em termos de magnitude, a catástrofe climática em questão pode ser compreendida para além de um ponto fora da curva que institui, enfim, uma nova realidade. Na verdade, a região Sul do Brasil tem sido marcada por recorrentes episódios de extremos climáticos, que se alternam entre fortes estiagens e chuvas excessivas. É impossível, por exemplo, evitar o paralelo entre as inundações de 2024 e as severas precipitações ocorridas no Rio Grande do Sul em novembro de 2023. Ambas recuperam, conjuntamente, a memória da emblemática enchente de 1941 em Porto Alegre. Tampouco é possível esquecer quando, em 2004, um forte ciclone atingiu o estado vizinho de Santa Catarina; ou quando, em 2022, diante de uma intensa estiagem, vastos incêndios se manifestaram na Estação Ecológica do Taim.

Lucas Leffa/Secom-PR



Imagem de satélite mostra a enchente de 2024, na Região Metropolitana de Porto Alegre, do Rio Grande do Sul

“Torna-se urgente
a elaboração de
estratégias de adaptação
e resiliência
climática.”



Sob essa perspectiva, uma particularidade das inundações de 2024 está na demonstração de que, como previsto por inúmeros especialistas, regiões que já eram suscetíveis ou vulneráveis a extremos climáticos serão possivelmente expostas a eles com maior frequência e intensidade. O caso do Rio Grande do Sul, portanto, se soma a outras experiências globais para mostrar uma face menos conhecida das mudanças climáticas: a desigualdade dos impactos gerados pelo aquecimento do planeta, seja em termos dos territórios atingidos, seja em relação às populações afetadas. É diante dessas disparidades que se torna urgente a elaboração de estratégias de adaptação e resiliência climática, cujos objetivos se resumem a conter, evitar, ou mesmo preparar territórios vulneráveis para a maior e mais intensa ocorrência de eventos extremos. Ao que tudo indica, essa é uma tarefa complexa, que exige a coordenação fina entre uma série de variáveis, como a disponibilidade de recursos financeiros, o planejamento coordenado entre as esferas responsáveis e a formulação de conhecimento científico especializado, capaz de orientar a elaboração de soluções criativas e eficientes.

É frente a essa tarefa que a presente publicação procura cumprir seu papel. Sua elaboração resulta do trabalho desenvolvido no âmbito da Secretaria Extraordinária da Presidência da República para o Apoio à Reconstrução do Rio Grande do Sul (Sers), que, entre suas ações, buscou fomentar condições para que o esforço de reconstrução do estado persistisse para além das medidas de curto prazo, mobilizando diversos setores da sociedade gaúcha nessa reflexão. A partir da cooperação com a Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo (FESPSP) e contando com recursos doados pela Open Society Foundations, a Sers concebeu o projeto **RS: Resiliência & Sustentabilidade**, que buscou atribuir à pesquisa universitária o protagonismo na formulação de uma agenda de reconstrução voltada para a adaptação e a resiliência climáticas como pilares para o desenvolvimento sustentável do estado e do país.

Por meio da interlocução com as respectivas reitorias, o projeto convidou as universidades federais sediadas no território gaúcho (UFRGS, UFPEL, UFSM, FURG, UNIPAMPA e UFSCPA) a mobilizar sua inteligência instalada – seus pesquisadores, laboratórios e centros de pesquisa – para debater perspectivas possíveis de reconstrução do estado diante das inundações de 2024, no médio e no longo prazo. A reconstrução, neste caso, abrange desde a promoção de alternativas de gestão, tecnologias e organização do espaço voltadas à necessidade de adaptação climática, até a perspectiva em torno de um desenvolvimento capaz de recorrer à resiliência climática como estratégia de fortalecimento da economia e de inclusão social.

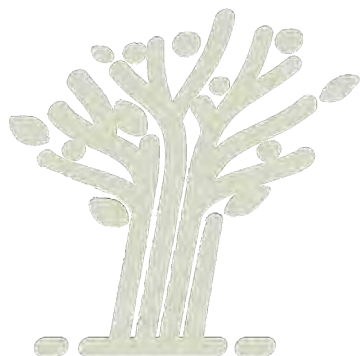
Com duração de seis meses, o projeto forneceu recursos financeiros para que essas equipes sistematizassem suas próprias formulações teóricas e empíricas em pequenos artigos capazes de comunicar diagnósticos e sugerir caminhos de ação concretos para o enfrentamento a eventos climáticos extremos. O formato proposto buscou reconhecer e validar os conhecimentos gestados nas universidades situadas no Rio Grande do Sul, entendendo-as como necessárias interlocutoras na elaboração

de uma agenda em torno da resiliência climática no Brasil. Espera-se, portanto, que os textos presentes nesta publicação sirvam para mobilizar o debate entre governos, empresas, representantes da sociedade civil e outros atores relevantes, na medida em que joga luz à gravidade dos problemas e à possibilidade de soluções práticas e acessíveis.

É preciso reconhecer, todavia, que a amostra de pesquisas aqui compilada de forma alguma esgota as contribuições que as universidades federais gaúchas provêm para o debate em torno das mudanças climáticas e do enfrentamento a eventos climáticos extremos. Diante das limitações do projeto, optou-se pela diversificação dos centros contemplados e das áreas temáticas tratadas, também com o intuito de reforçar a complexidade e a dimensão transdisciplinar da questão em foco. Não se pretende, portanto, que esta publicação tenha caráter seminal ou sintetize o estado da arte da discussão proposta. Pelo contrário, como bem indica o tempo de duração do projeto, a prioridade foi manter ativa a memória das inundações de 2024 e mobilizar, por meio de contribuições que pontuam observações relevantes, um esforço contínuo e de longo prazo de produção de conhecimento acadêmico comprometido com a reconstrução do estado.

Este volume foi organizado a partir das proximidades temáticas que emergiram dos artigos produzidos pelas equipes de pesquisa. A seguir, uma breve descrição dessas contribuições procura apresentar de forma sucinta a trajetória do debate proposto.

A publicação é inaugurada pelo prefácio escrito pelo prof. Rualdo Menegat (Geologia – UFRGS), que introduz a problemática das mudanças climáticas como pano de fundo do debate proposto, pontuando uma longa trajetória de coevolução entre as organizações





“O esforço deste projeto, sintetizado com simplicidade neste livro, é o de sinalizar uma agenda de resiliência e sustentabilidade.”

Porto Alegre, esquina da Rua Pinto Bandeira com a Rua Voluntários da Pátria.

humanas e a paisagem natural da Terra, cada qual com sua dinâmica, mas profundamente integradas e indissociáveis. Ao destacar a mudança estrutural provocada pelo consumo massivo de combustíveis fósseis nos termos dessa coevolução, a contribuição ressalta a importância de atentar para como a emergência climática que contextualiza o atual período de ocupação humana do planeta interage com as características e as condições dispostas em cada região. A partir disso, adianta alguns dos pontos críticos que destacam o Rio Grande do Sul como foco de atenção nesse contexto emergencial, os quais são retomados ao longo das contribuições que se seguem.

A partir desse panorama, torna-se possível introduzir o acontecimento que motiva a reflexão proposta pela publicação. Esse papel é cumprido pelo primeiro artigo, que consiste em um relato detalhado da cheia de 2024, elaborado pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS sob a coordenação do prof. Walter Collischonn (Hidrologia – UFRGS). No texto, os autores destacam a excepcionalidade das chuvas ocorridas em abril e maio e descrevem os processos que contribuíram para uma rápida e intensa cheia nas bacias hidrográficas do estado, ressaltando como particularidades do território gaúcho contribuem para dinâmicas como a observada no episódio.

Dando sequência a esse relato, o foco passa a ser nos impactos econômicos e sociais das chuvas e inundações ocorridas em 2024. De forma geral, os três artigos em questão permitem identificar fragilidades emergentes em situações climáticas extremas como a observada e, dessa forma, fornecem perspectivas para reconhecer e instituir caminhos rápidos e efetivos de reação, evitando um prolongamento dos danos e o aumento dos custos econômicos e sociais.

A primeira discussão nessa linha é proposta pela equipe de pesquisa coordenada pelo prof. Gibran Teixeira (Ciências Econômicas – FURG) e procura responder a seguinte pergunta: que impactos foram observados da cheia de 2024 sobre os empregos, os níveis de arrecadação municipal e o atendimento à saúde no Rio Grande do Sul? Por meio do emprego de métodos econométricos, os autores identificam movimentos bem particulares ocorridos no mercado de trabalho gaúcho na sequência dos eventos de abril e maio, além de alterações na trajetória de arrecadação dos municípios e piora das condições de acesso à saúde.

Os dois artigos seguintes permitem situar os resultados mencionados em contextos específicos e localizados. Uma das contribuições é feita pela equipe coordenada pela prof.^a Lucia Pellanda (Saúde Coletiva – UFCSPA) e busca discutir que mobilizações podem ser esperadas dos sistemas de saúde pública diante de eventos extremos como o ocorrido, relacionando-as com o que de fato foi colocado em vigor no Rio Grande do Sul durante o contexto de crise. A partir de um levantamento das lições desse processo, os pesquisadores propõem um protocolo de gestão sanitária para desastres, vislumbrando um modelo replicável pelas autoridades de saúde brasileiras, buscando garantir a resiliência dos sistemas em casos de eventos climáticos extremos.



Lucas Leffler/Secom-PR

“É preciso, ao fim, uma estratégia comum que situe os esforços de adaptação e resiliência climática no âmbito de um projeto de prosperidade econômica e social.”

Inundação de 2024 na
Região Metropolitana de
Porto Alegre

Outra dimensão dos impactos das enchentes se relaciona com os danos sentidos pela atividade agrícola, tendo em vista, por um lado, sua relevância para a economia gaúcha e, por outro, os fortes movimentos de massa causados pelas chuvas. Sob a coordenação do prof. Gustavo Brunetto (Ciências do Solo – UFSM), uma equipe de pesquisadores coletou e analisou amostras de solo afetadas pelas chuvas de abril e maio na região da Serra Gaúcha. Ao identificar as particularidades da deterioração ocorrida, o artigo recomenda procedimentos e técnicas que podem servir de base para promover uma rápida recuperação de solos afetados por eventos climáticos extremos como o verificado em 2024.

A discussão sobre práticas, técnicas e tecnologias que permitem prevenir, proteger ou reagir diante da maior frequência de episódios climáticos extremos tem destaque nesta publicação. Reconhece-se, aqui, a necessidade de sugerir caminhos efetivos e factíveis para reduzir o potencial de danos de eventos dessa natureza e a possibilidade de utilizar uma vasta gama de técnicas e processos para constituir protocolos de gestão de ocorrência de desastres climáticos. Nessa linha, o artigo que dá sequência à publicação foi elaborado a partir da experiência da prof.^a Elisa Fernandes (Oceanografia – FURG) e do prof. Glauber Gonçalves (Ciências Computacionais – FURG) no enfrentamento da

enchente de 2024 na cidade de Rio Grande. O texto relata a elaboração e a utilização de um modelo capaz de replicar, computacionalmente, as condições meteorológicas, oceanográficas e geodésicas específicas de uma região costeira, identificando os potenciais pontos críticos de inundações. Os pesquisadores descrevem os passos e os elementos necessários para produzir modelos dessa natureza, apontando, a partir do caso da cidade de Rio Grande, formas possíveis de ampliar a cooperação entre universidade e autoridades especializadas no enfrentamento de catástrofes climáticas.

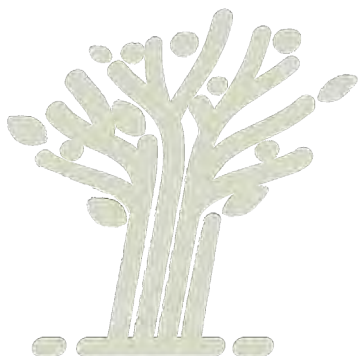
O artigo que segue foi desenvolvido pela equipe de pesquisa coordenada pelo prof. Fabrício Harter (Meteorologia – UFPEL). De forma complementar, a contribuição ressalta a importância de aprimorar tecnologias para fornecer previsões do tempo em curtíssima escala, isto é, poucas horas antes de um evento meteorológico ocorrer. Nesse caso, os pesquisadores fazem uso de inteligência artificial para alimentar um radar meteorológico capaz de garantir eficácia na previsão de curto prazo de sistemas meteorológicos críticos, como um tornado.

Ainda que o desenvolvimento de soluções técnicas para o enfrentamento das mudanças climáticas seja urgente, não é razoável preterir as reflexões mais estruturais, que reconheçam os entraves e limites dos modelos de gestão econômica e do território atualmente praticados e, assim, sugiram alternativas críticas e de relevância. Esse é, de forma geral, o debate proposto nos quatro textos que encerram esta publicação.

Primeiro, destaca-se o artigo coordenado pelo prof. Hélio Henkin (Ciências Econômicas – UFRGS), que relaciona a resiliência climática com a dimensão concreta do desenvolvimento econômico, discutindo a evolução da estrutura



Atendimento aos atingidos
pela enchente em um
dos hospitais de campanha
da Força Nacional do SUS
em Porto Alegre

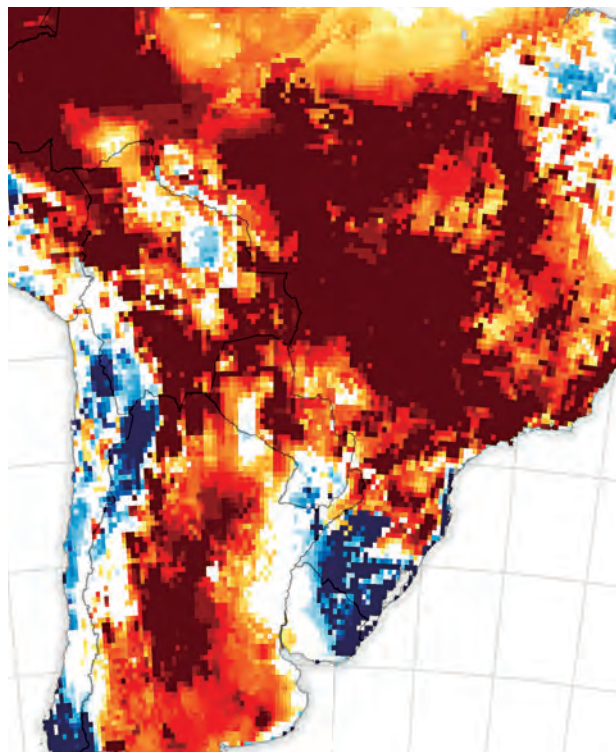


“O exemplo do RS mostra
ser necessário refletir sobre as
mudanças climáticas a partir de
um olhar que valorize a questão
ambiental, as populações
atingidas e as estratégias de
preservação da vida.”

produtiva do Rio Grande do Sul à luz das últimas e das próximas décadas. Nesse caso, há a preocupação em destacar a diversificação e a sofisticação da produção como elementos relevantes para ampliar as condições da economia de resistir a choques climáticos. Em seguida, a contribuição coordenada pelo prof. Rafael Cruz (Ciências Ambientais – UNIPAMPA) põe luz a uma dimensão da crise climática que é particularmente importante aos gaúchos: o risco de deterioração do bioma Pampa diante dos extremos climáticos e de práticas pouco sustentáveis de manejo da terra e de produção agrícola. A partir desse diagnóstico, a equipe de pesquisa propõe orientações de políticas públicas que contemplam tanto aspectos técnicos associados à gestão do território produtivo do Pampa, quanto diretrizes formativas e educacionais.

O penúltimo texto é resultado de um esforço coletivo de pesquisadoras e pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional (PROPUR) da UFRGS, coordenado pelas professoras Luciana Miron e Martina Lersch (Arquitetura e Urbanismo – UFRGS). Com foco na Região Hidrográfica do Guaíba, a contribuição refere-se a experiências nacionais e internacionais de enfrentamento a desastres hidrológicos para compreender as condições específicas do território em questão, analisando os instrumentos de planejamento urbano e regional possíveis e necessários frente às mudanças climáticas. Com uma abordagem que propõe um olhar combinado para tecnologias, políticas, mercados, discursos e fontes de conhecimento, o artigo apresenta diretrizes para orientar ações de curto, médio e longo prazo no que se refere à gestão do espaço urbano e regional.

O artigo que encerra a publicação consiste em mais uma contribuição dos pesquisadores do IPH. A partir de uma reflexão em torno do



Nasa

As pesquisas apoiadas estão fundamentadas em diferentes áreas do conhecimento - meteorologia, hidrologia, economia, planejamento urbano, agronomia, saúde coletiva, gestão ambiental, oceanografia, ciências da computação, entre outras.

histórico das cheias no Rio Grande do Sul e da relação dessa trajetória com a intensificação das mudanças climáticas, os pesquisadores avaliam e discutem criticamente as medidas possíveis de ampliar a capacidade de adaptação e resiliência climática no estado, seja em termos de infraestrutura, seja na capacidade de gestão em torno de uma nova realidade climática.

Por fim, é importante lembrar que o episódio trágico das enchentes de 2024, apesar de suas consequências dramáticas, também sinalizou movimentos importantes e valiosos para o Rio Grande do Sul. Um deles, que importa exaltar e incentivar, foi o forte sentimento comunitário da sociedade gaúcha, evidenciado na organização coletiva e voluntária de milhares de cidadãos, que, de forma autônoma, trabalharam ativamente no resgate de pessoas e no suporte à reconstrução de milhares de vidas que ficaram suspensas durante o período de desastre e pós-desastre. Outro ponto que merece ser assinalado é a rápida resposta dada pelo poder público, em suas diferentes esferas. A enorme mobilização de recursos garantida pelo Governo Federal, que soma, até agora, mais de R\$ 100 bilhões, forneceu relativa segurança e estabilidade à população gaúcha por meio da garantia ao acesso a renda, da recomposição da infraestrutura básica e da recuperação da dinâmica da economia gaúcha. Os resultados dessa ação estão ilustrados, por exemplo, no desempenho do PIB e da arrecadação do Rio Grande do Sul para o ano de 2024, que contrariaram os piores prognósticos expressos por diferentes analistas.

O esforço deste projeto, sintetizado com simplicidade neste livro, é o de sinalizar uma agenda de resiliência e sustentabilidade, um desafio que está sendo enfrentado por várias instituições, públicas e privadas, mas que precisa ser transformado em prática concreta de entes sociais e governamentais, por meio de ações e de políticas públicas que remetam para a construção de um novo tipo de relacionamento com a natureza e com as necessidades humanas. Levanta-se, aqui, a ideia de que é preciso, ao fim, uma estratégia comum que situe os esforços de adaptação e resiliência climática no âmbito de um projeto de prosperidade econômica e social, que reconheça o caráter

desigual dos efeitos das mudanças climáticas e, portanto, viabilize uma resposta concreta, factível e eficaz. O que esta publicação busca mostrar é que, apesar do desastre de 2024, a reconstrução não é apenas um desafio gaúcho ou brasileiro.

O exemplo do Rio Grande do Sul mostra ser necessário refletir sobre as mudanças climáticas a partir de um olhar que valorize a questão ambiental, as populações atingidas e as estratégias de prevenção da vida. Esse é um desafio para líderes de todo o mundo, que, ao acompanhar nossa tragédia e a efetividade das nossas respostas, podem ponderar o quanto nossas ações são capazes de se transformar em modelo a toda a Terra.

João Ferrer

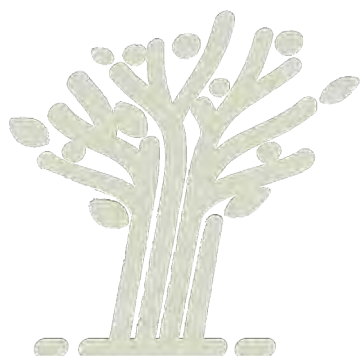
Mestre em Administração Pública (FGV/RJ)

Marcelo Danéris

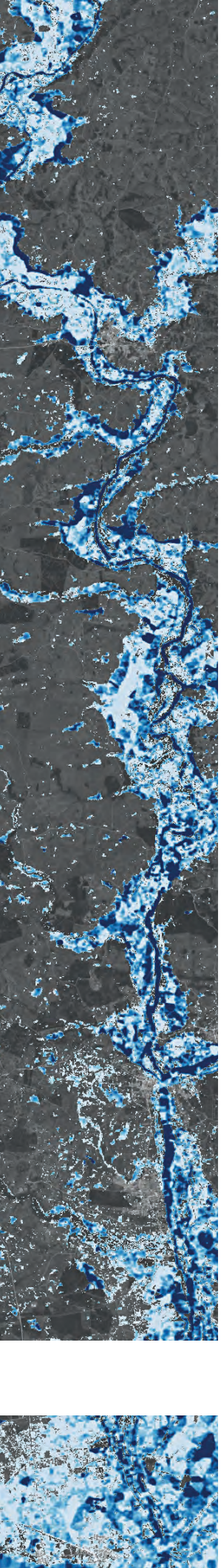
Doutor em Ciência Política (UFRGS)

Pedro Romero Marques

Doutor em Economia (USP)



“Tudo está integrado
na superfície planetária:
fronteiras
coevolutivas
e mudanças climáticas.”



PREFÁCIO

Clima: a nova fronteira da interconexão humana com a Terra no Antropoceno

RUALDO MENEGAT

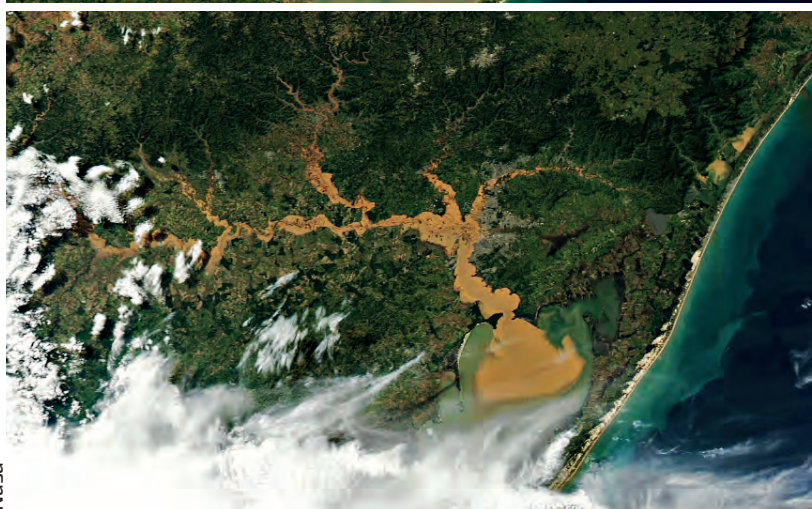
Professor titular do Instituto de Geociências da UFRGS, coordenador geral do Atlas Ambiental de Porto Alegre, vice-presidente científico do Foro Latino-Americano de Ciências Ambientais – Cátedra Unesco de Desenvolvimento Sustentável, presidente da Sessão Brasileira da International Association for Geoethics, membro da Comissão de Geoética da Sociedade Brasileira de Geologia

Fronteiras sólidas e prepotência: é possível dominar a natureza?

Desde a antiguidade clássica, superar as fronteiras tem sido um desafio para as civilizações ocidentais. As cidades-estado amuradas da Suméria e o pagus, a área rural que se estendia um pouco além delas, constituía uma unidade cultural que não ia além da planície dos grandes Rios Tigre e Eufrates. Ultrapassar essas fronteiras dos pequenos reinos urbanos da Mesopotâmia antiga desafiava os reis sumérios. O desconhecido mundo além-fronteiras sempre representava grandes riscos, mas também poderia trazer riqueza e glorificação do conquistador, marcando a memória do povo. Inscrever-se nessa memória sempre foi uma ambição dos governantes de então. Entre eles, Alexandre, o rei da Macedônia, que ganhou o epíteto de “o Grande”, por conta da audaciosa expansão de seus domínios para o oriente asiático. Posteriormente, esse modelo foi repetido com grande sucesso pelos romanos no processo de colonização da Europa e do norte da África.

A história da Era Moderna do Ocidente, que surge a partir do Renascimento, traduziu-se também em um longo período de expansão de fronteiras para o Novo Mundo, as Américas, estabelecendo domínios de extrativismo irrefreável da natureza e da colonização. Não apenas as terras continentais foram dominadas. Os europeus passaram a navegar sistematicamente os tempestuosos oceanos Atlântico, do Norte (então chamado “Mar do Norte”) e do Sul (“Mar Etiópico”), e também do Índico (“Mar Oriental”) e do Pacífico (“Mar do Sul”) com grandes embarcações de madeira, construídas com a derrubada de florestas, como destacou o professor Michael Williams em seu livro *Deforesting the Earth* (2003).

Na memória histórica, fronteira significa a mudança de limites do território dominado, preponderantemente insular e continental, quer dizer, as porções sólidas da superfície do planeta e, eventualmente, as líquidas, como espelhos de lagos, rios e mares territoriais. Quando as fronteiras mudam, diz-se que muda a história (Toynbee, Fernandez -Armesto). Tal mudança estabelece também um limite no tempo histórico entre um antes e um depois do evento que produziu o novo cenário. O desenvolvimento da ciência cartográfica contribuiu para a mudança das fronteiras territoriais e marítimas. O mundo cheio de deuses e seres mitológicos da antiguidade clássica e medieval foi sendo substituído pela objetividade das representações. Em duas dimensões (x e y), os mapas organizados em coordenadas geográficas, grafavam as linhas de fronteiras e os polígonos de dominação territorial, esqueteando os ecossistemas e suas intrincadas relações tridimensionais. Os domínios representados em um plano cartográfico reduziram o complexo mundo em que vivemos a áreas, caminhos, distâncias e meios de transporte de materiais e



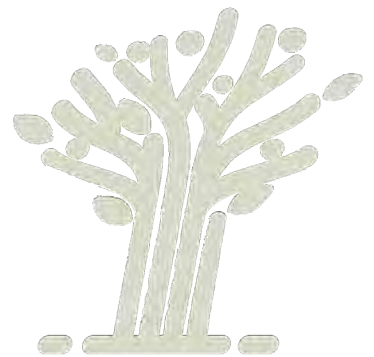
Nasa

Imagens da inundação no Rio Grande do Sul capturadas por satélite. Foto acima, em 20 abril 2024 e, abaixo, em 6 maio 2024.

humanos. A síntese desse mosaico foi entendida pelo escritor francês Júlio Verne [1828-1905]. Em 1873, em seu visionário livro *A volta ao mundo em 80 dias*, Verne já mostrava os polígonos nacionais, rodovias, ferrovias, hidrovias e meios de transporte, evidenciando os sinais de esgotamento da busca de novas fronteiras territoriais em um mundo globalizado.

No final dos anos 1960, em plena guerra fria, emergiu uma nova fronteira de expansão. Diferentemente das anteriores, então engessadas pelos armistícios que dividiram o mundo do pós-guerra, as viagens espaciais vão em busca de novas fronteiras, agora postas em um meio gasoso. Navegar na alta atmosfera e, depois, no espaço sideral até a Lua renovou esse programa colonial de expansão de limites e caminhos de apropriação do território, que

“O clima controla o sistema hidrológico em cada lugar, desde o volume das cascatas até a escassez em córregos efêmeros.”



se confunde com a noção milenar de domesticar a Terra. Aqui domesticar significa tanto o uso como também a familiaridade com um organismo ou paisagem cujo comportamento é orientado pela atividade humana. A corrida espacial e, depois, a globalização nos trouxeram uma ideia de que estavam esgotadas as fronteiras do planeta. O mundo parecia domesticado a ponto de podermos bradar e bater no peito dizendo: o “nosso mundo” a “nossa Terra”, como bem assinalou o renomado historiador da ciência, Michel Serres.

Mas isso não aconteceu sem enormes danos ambientais, vistos aqui como a ponta do iceberg da prepotência: a de considerar a Terra como sendo um chão que se poderia palmilhar, alargar fronteiras e, de fato, subjugar a natureza por meio de sua destruição. O filósofo da ciência renascentista, Francis Bacon, um dos arautos do método científico, escreveu ainda em 1620: “a melhor maneira de dominar a natureza é obedecendo-a”, mas esse adágio ficou soterrado pela ambição desmedida por riqueza.

A atmosfera desconhecida e a face da Terra: fronteiras difusas e gasosas

A corrida espacial, contudo, revelou mais do que a engenhosidade dos foguetes e da astronáutica – impulsionadora de uma corrida tecnológica que desenhou os últimos 50 anos. Olhar os foguetes subindo para o espaço sideral devolveu um sentido de tridimensionalidade para a representação da Terra. Até então, as imagens eram calcadas em mapas com figuras cada vez mais geométricas e poligonais onde somente cabiam pontos representando cidades. Pela primeira vez, alguns humanos, que tripulavam os foguetes, puderam ver a totalidade do nosso mundo a partir de uma paisagem sideral passível de ser gravada em uma fotografia (Figura 1). A mais famosa imagem desse período e uma das mais difundidas no mundo é conhecida como Blue Marble (“Mármore Azul”). Ela foi obtida pela tripulação da Apollo 17, em 7 dez. 1972, quando a nave rumava para a Lua. Na fotografia original, o sul está na parte superior da imagem. A África e a península da Arábia Saudita ocupam, junto com os oceanos Atlântico Sul (à direita) e o Índico (à esquerda) a porção inferior do globo. Na parte superior, encontra-se a Antártida, um continente bastante ausente em nossa cultura. Coberto por um manto gelado de 5,2 km de espessura, ele é chave no controle do clima relativamente frio da Terra. As nuvens esbranquiçadas sobre o fundo azul-escuro dos oceanos conferem o padrão de uma textura marmorizada, que dá o nome “mármore azul” a essa imagem.

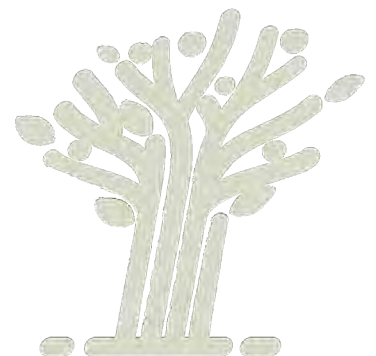
As imagens da Terra que se seguiram, obtidas pelos ônibus espaciais e pela Estação Espacial Internacional, revelaram um segredo profundo de nosso planeta: a atmosfera finalmente pôde ser vista como um delgado invólucro azulado cobrindo a um só tempo o planeta e cada um de nós. Esse punhado de ar que carregamos em nossos pulmões, renovado a cada vez que respiramos, não só nos mantém vivos, mas também nos conecta inextricavelmente à atmosfera, que contém a memória de processos fundamentais da evolução climática do planeta. A nova visão da atmosfera total (Figura 2) nos levou a entendê-la como um componente, até então pouco conhecido, e passível de ser impactado pelas atividades humanas. A imagem materializou a ideia de que tudo está conectado em uma paisagem global. Ninguém entendeu melhor essa conexão do que o cientista inglês



Figura 1. A primeira imagem por inteiro da Terra, conhecida como "Mármore Azul", originalmente obtida com o Sul para cima, é um ícone da luta pela proteção do planeta como uma totalidade.

Fonte: Nasa, AS17-148-22727 image.

Imagem fornecida pelo autor



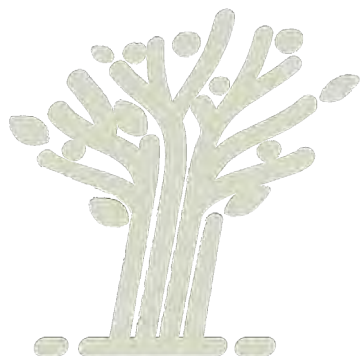
James Lovelock [1919-2022], autor da Teoria de Gaia. Em seus estudos, ele avançou as investigações do geoquímico russo-ucraniano Vladimir Vernadsky [1863-1945] e afirmou que a atmosfera planetária é o resultado de sua interação com a biosfera e vice-versa, uma gerando a outra em um processo coevolutivo.

Tudo está integrado na superfície planetária: fronteiras coevolutivas e mudanças climáticas

O entendimento integrado da atmosfera e do clima é relativamente recente nas ciências. Essa fronteira pouco desbravada sobre o estudo de gases nunca fez muito sucesso na ciência. Os principais estudos focavam os materiais sólidos, que emprestam figuras de linguagem que denotam fixidez, como "conhecimento sólido", "terra firme", "fundamentos", entre outros. As viagens naturalistas no século XIX expandiram as fronteiras como nunca então havia sido feito. O grande naturalista alemão, Alexander von Humboldt [1769-1859], mediu a variabilidade da pressão atmosférica com a elevação e

estabeleceu zonas climáticas ao escalar, em 1802, o vulcão Chimborazo, no Equador. Ele foi o primeiro a considerar que a supressão dos ecossistemas devido ao sistema de plantio intensivo, com base na mão de obra escravizada, levaria a significativas mudanças climáticas. Nesse mesmo período, o físico francês Jean Fourier [1768-1830] passou a considerar que a temperatura da superfície terrestre não dependeria apenas da distância de nosso planeta ao Sol. Ele supôs que a temperatura mais elevada do que aquela emitida pela radiação solar seria devida à atmosfera. Na época, desconheciam-se os mecanismos dos gases de efeito estufa que pudessem produzir esse calor extra.

O clima passou a ganhar a atenção de vários cientistas. Coube ao geólogo suíço Louis Agassiz [1801-1873] propor que, no passado da Terra, houve grandes mudanças climáticas sequenciais, chamando-as de Idades do Gelo. Ele estudou a ocorrência de grandes depósitos sedimentares de cascalho, chamados morainas, no norte da Europa e nos Alpes. Supôs que esses enigmáticos depósitos resultassem da expansão do gelo do Ártico em uma antiga era glacial. Assim, considerou que no último evento glacial o limite do gelo tivesse alcançado o norte da Europa. Com o derretimento do gelo até as dimensões atuais, o limite daquela expansão da Idade do Gelo teria ficado marcado pelos depósitos de cascalho e blocos erráticos que geralmente o gelo carrega enquanto desliza sobre os pavimentos rochosos. Estudos posteriores mostraram que Agassiz estava certo. As grandes glaciações deixaram registros de vários tipos que foram sendo identificados pelos geólogos. Mapas e estudos de detalhes evidenciaram que houve, nos últimos 400 mil anos, quatro grandes ciclos glaciais que intercalam períodos muito frios e



“A mudança do clima
tem a ver com
a paisagem e a
dinâmica natural do
local onde vivemos,
aqui e agora.”

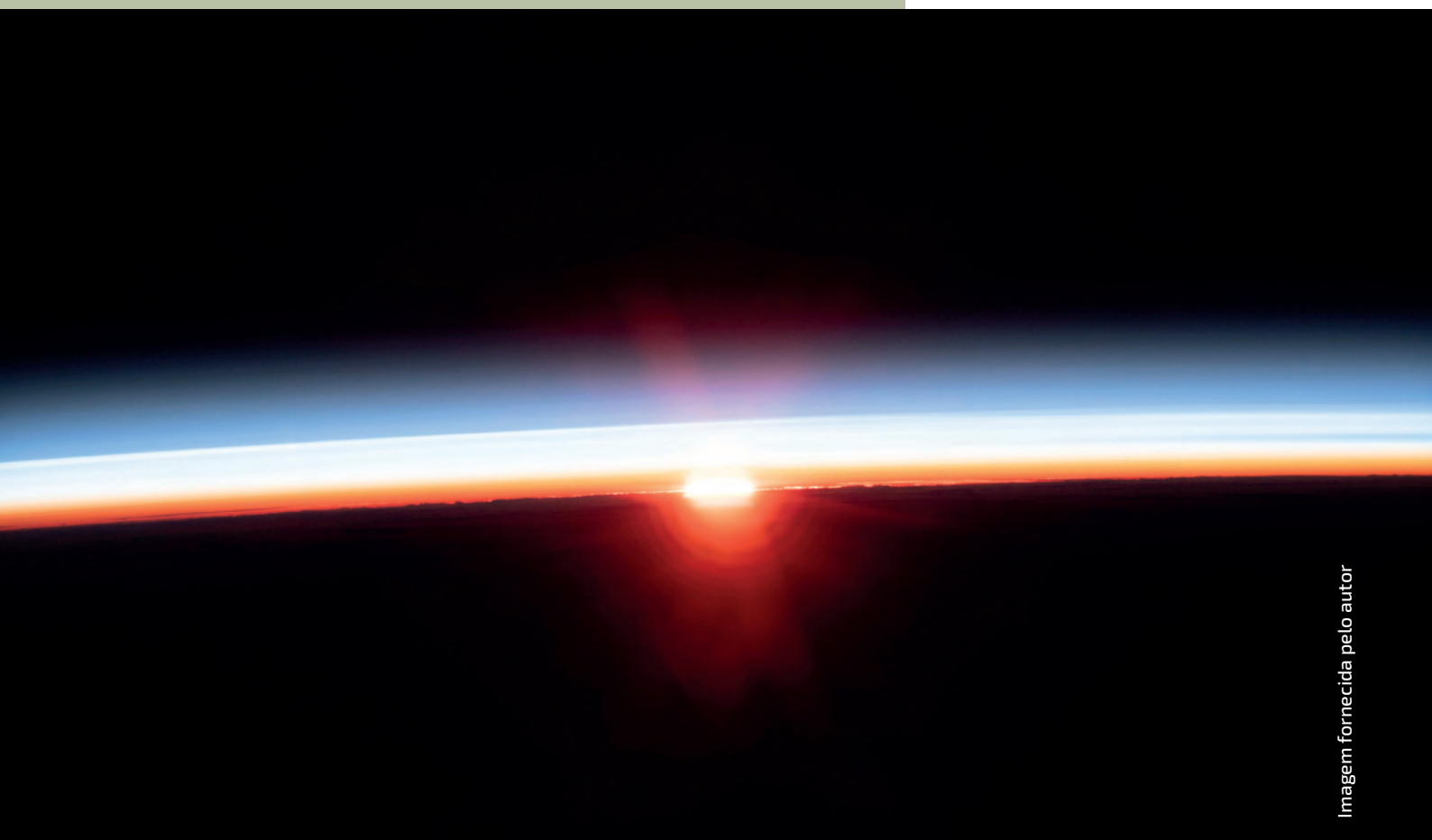


Imagem fornecida pelo autor

Figura 2. A delgada atmosfera da Terra vista durante o nascer do sol desde a escotilha da Estação Espacial Internacional. A banda alaranjada no horizonte corresponde à Troposfera (6-12 km de espessura), onde se concentram cerca de 80% da massa atmosférica; a faixa esbranquiçada, à Estratosfera (50 km); e, a camada azulada, à Mesosfera.

Fonte: fotografia ISS070-E-1178 de 29/09/2023 e publicada no Earth Observatory-Nasa/JSC em 01/01/2024.

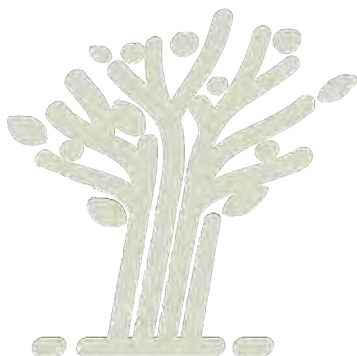


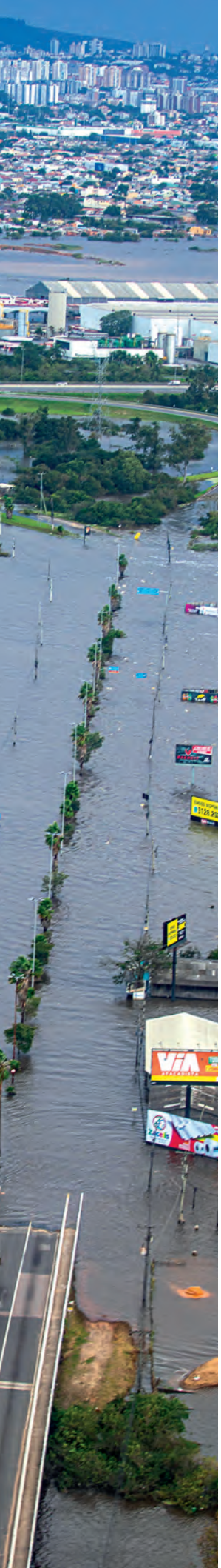
Imagem fornecida pelo autor

Figura 3. Esta pilha de estratos de rochas calcárias registra dois ciclos de subida e descida relativa do nível do mar, ocorridos há 70 milhões de anos, no Período Cretáceo. Quando o clima fica mais quente, as geleiras continentais derretem e o nível dos oceanos se eleva. Com base em registros desse tipo, os geólogos reconstróem curvas paleoclimáticas da Terra. Foto: professor Rualdo Menegat, em Torotoro, Bolívia, expedição aos Andes Orientais de 2016.

intervalos mais quentes, chamados de interglaciais, como o que está em vigor. Os geólogos chamam esse intervalo, que se iniciou há 11.700 anos, de Holoceno.

Esses eventos glaciais e interglaciais mostraram algo que até então parecia ser impossível: o clima da Terra não é estático às latitudes e elevações, ele muda ao longo do tempo. Os rastros glaciais conectaram nosso mundo presente com o passado da Terra, mostrando que ele resultou de processos coevolutivos no tempo. Mais além, as sequências de rochas sedimentares analisadas pelos geólogos registram ambientes muito mais antigos da Terra e se constituem em uma imponente memória da variabilidade climática do planeta (Figura 3). O clima atual resulta dessa longa evolução, que pode ser rastreada e entendida.





Lucas Leffa/Secom-PR

O sistema do clima: interconexões em todas as escalas e lugares

A interação das rochas e solos com a água, gases da atmosfera e as formas de vida pode ser vista desde as escalas locais dos ecossistemas e geossistemas até a escala planetária. Nessa escala, todos os componentes das porções superficiais – chamados de litosfera, hidrosfera-criosfera, biosfera e atmosfera – e suas interações formam o sistema do clima. Portanto, esse sistema também é parte importante na configuração da face do planeta (Figura 1). Usualmente, ele é entendido como a temperatura percebida pela nossa pele em um dia frio ou quente, uma tempestade forte, um furacão, uma seca ou uma oscilação como a do El Niño. O sistema do clima é aquele que define a proporção global da água em seus estados sólido, líquido e gasoso que podemos encontrar em um determinado intervalo de tempo. Se a temperatura média global aumenta ou diminui, muda a extensão das geleiras e, no limite, há a supressão delas. Se os mantos continentais de gelo derretem, o nível de todos os oceanos sobe. Mais aquecida, a atmosfera não só se dilata como armazena uma quantidade maior de vapor d'água, o que conduz à intensificação das precipitações como chuva e neve. O clima controla o sistema hidrológico em cada lugar, desde o volume das cascatas até a escassez em córregos efêmeros.

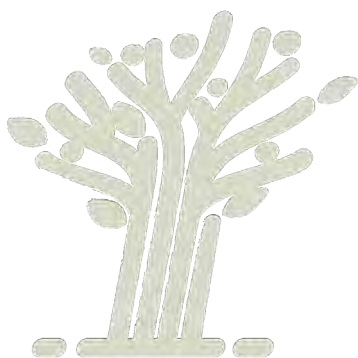
O sistema climático delimita as fronteiras de distribuição das diferentes formas de vida, da propagação de insetos até a habitabilidade da espécie humana. Ele demarca os limites do habitat gelado dos ursos e também do habitat quente e úmido das araras, dos jundiás e dos mosquitos. Não apenas determina a expansão e retração de biomas, mas estes são também sustentáculos dele. Cada grão de areia ou camada de calcário, cada grão de feldspato de um granito sustenta o clima e é por ele alterado. Então, se o clima muda, mudam as estruturas e os padrões que conformam a paisagem da face da Terra, desde a macro até a microescala.

O clima define as fronteiras dos sistemas naturais, entendidas como interfaces de interação entre seus componentes sólidos, líquidos e gasosos. Uma dessas grandes interfaces planetárias é a da biosfera. Localmente, a biosfera é constituída por indivíduos, macroscópicos ou microscópicos, que se agrupam em assembleias de seres vivos e não vivos, formando um



Imagem mostra a região central do estado do Rio Grande do Sul tomada pelas águas do Rio Jacuí

“A partir da Revolução Industrial, o maquinismo incessante foi produzindo alterações do ambiente em larga escala.”



ecossistema. Assim, cada região coberta pela rede da vida constitui a impressionante diversidade de paisagens terrestres, sendo interfaces regionais de interação dos componentes do sistema do clima. Por isso, a mudança do clima tem a ver diretamente com a paisagem e a dinâmica natural do local onde vivemos aqui e agora. Essa interação de componentes e processos desse sistema, ao longo da história geológica, nos legou a configuração da Terra de hoje. Esse mundo atual é, portanto, um dos vários mundos possíveis do planeta.

Megalópoles e monoculturas do Antropoceno: a pegada geológica da humanidade

O renomado historiador inglês Felipe Fernández-Armesto [1950-...] escreveu uma história das civilizações diferente de uma mera sequência cronológica, como é usualmente ensinada na escola. Em seu livro *Civilizations* (2000), ele inscreveu a construção de cada civilização nos grandes ambientes e paisagens da Terra, cuja contínua adaptação ao longo do tempo desenhou o que chamamos de cultura. Existem tantas culturas quanto paisagens. Cada uma delas se constituiu como um face a face do lugar, porque coevoluíram na e com a paisagem. Assim, não há como falar dos Incas sem as montanhas e vales dos Andes Centrais, ou dos Yanomami e Ticuna sem a cobertura hidroflorestal da Amazônia. Quando fazemos alusão aos egípcios antigos, logo os relacionamos às terras férteis do Nilo, e assim indefinidamente.

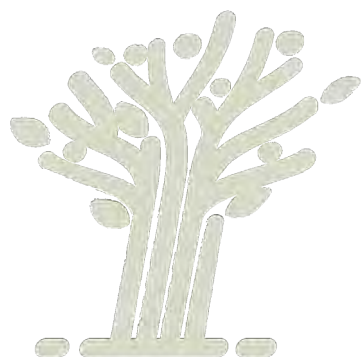
A Era Moderna modificou essa coevolução das culturas humanas com sua paisagem. A partir da Revolução Industrial, o maquinismo incessante foi produzindo alterações do ambiente em larga escala. Nas áreas rurais, as monoculturas alteraram completamente os ecossistemas,

suprimindo os mosaicos da vegetação natural. Florestas, savanas, campos e banhados foram substituídos por monoculturas cujos tabuleiros ininterruptos podem alcançar áreas tão vastas quanto jamais pensadas. Ali, não sobrou sequer uma árvore para abrigar ninhos de pássaros. Os ecossistemas e as paisagens, que são pilares do clima como vimos, foram sendo paulatinamente modificados.

O crescimento urbano é a outra face de ruptura com o ambiente. A partir de 1988, a população mundial urbana ultrapassou a rural. Em 2050, estima-se que a população mundial alcance a cifra de 9,7 bilhões de habitantes, dos quais quase 70% vivendo em cidades. Estas já não são núcleos isolados, mas podem se constituir em imensas regiões urbanas, chamadas de megalópoles. Algumas delas têm cerca de 130 mil quilômetros quadrados, onde vivem mais de 50 milhões de pessoas, como a megalópole da costa leste dos Estados Unidos, que integra várias megacidades desde Boston, a norte, passando por Nova York e Filadélfia, até Washington D.C., a sul. Acompanhando a costa leste da ilha Honshu, no Japão, distribui-se em cerca de 600 km de extensão Tokaido, uma megalópole de 66 milhões de pessoas formada pelas cidades de Tóquio-Yokohama-Nagoya-Osaka-Kobe. A megalópole de Guanzhou-Shenzhen-Macau, que ocupa a região do delta do Rio Pérola, na costa sul da China, abriga mais de 100 milhões de pessoas. As cidades, grandes

ou pequenas, possuem fluxos metabólicos lineares. Elas importam do meio natural todos os materiais que sustentam a vida e as atividades de seus habitantes e descartam na natureza milhões de toneladas de materiais semiaproveitados e altamente poluentes de todos os tipos, sólidos, líquidos e gasosos.

Todos esses aspectos urbanos e rurais, que demandam alto consumo de energia, modificam sobremaneira as estruturas ecossistêmicas, as paisagens, o meio ambiente e o clima, constituem a nova face e novo tempo da Terra, chamado de Antropoceno. Como definiu o cientista neerlandês Paul Crutzen [1933-2021], que recebeu o Prêmio Nobel por seus trabalhos em química atmosférica, esse é o tempo em que as atividades humanas, preponderantemente aquelas impulsionadas pelas grandes economias, a partir da Revolução Industrial, adquiriram a mesma capacidade de transformação da superfície terrestre que uma força geológica natural. Isso empurra a humanidade para uma nova fronteira da sua relação com o planeta. Mas não só a humanidade, também grande parte das espécies de seres vivos, algumas delas já extintas e, outras, em vias de extinção.



Mudanças antrópicas do clima: Revolução Industrial e emissões de CO₂ fóssil

A Revolução Industrial deu-se com base na queima de combustíveis fósseis. No início, do carvão e, depois, do petróleo e do gás. A queima desses combustíveis, as atividades industriais e de monoculturas geram grande quantidade de gases de efeito estufa. Esses gases aumentam a temperatura média global da superfície da Terra. Embora Fourier tivesse dito que a atmosfera era importante na determinação do clima da Terra, ele não havia especificado como isso acontecia. John Tyndall [1820-1893], um físico irlandês e estudioso das geleiras alpinas, conjecturou que os gases de efeito estufa – CO₂, H₂O, CH₄, O₃, N₂O – bloqueiam a radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, ocasionando o aumento da temperatura superficial. Mas foi o cientista sueco e Nobel em Química, Svante Arrhenius [1859-1927], quem estabeleceu a equação desse aquecimento. Em 1896, por meio de seus cálculos, ele chegou à seguinte conclusão: “qualquer duplicação do percentual de dióxido de carbono no ar aumentaria a temperatura da Terra em 4°C”. Arrhenius estava interessado em descobrir qual o mecanismo que produzia as mudanças climáticas nas Eras Glaciais. Mas ele percebeu que as emissões produzidas a partir da queima de combustíveis fósseis e outros processos de combustão já eram grandes o suficiente para provocarem um aquecimento global.

Cerca de 60 anos depois, o químico e geólogo estadunidense, Charles Keeling [1928-2005], passou a medir a concentração de CO₂ em um lugar distante das cidades e das indústrias poluidoras. Ele construiu um laboratório de alta resolução na ilha Manua Loa, no Havaí, e, a partir de 1958, começou a fazer medidas sistemáticas. A curva assim obtida,

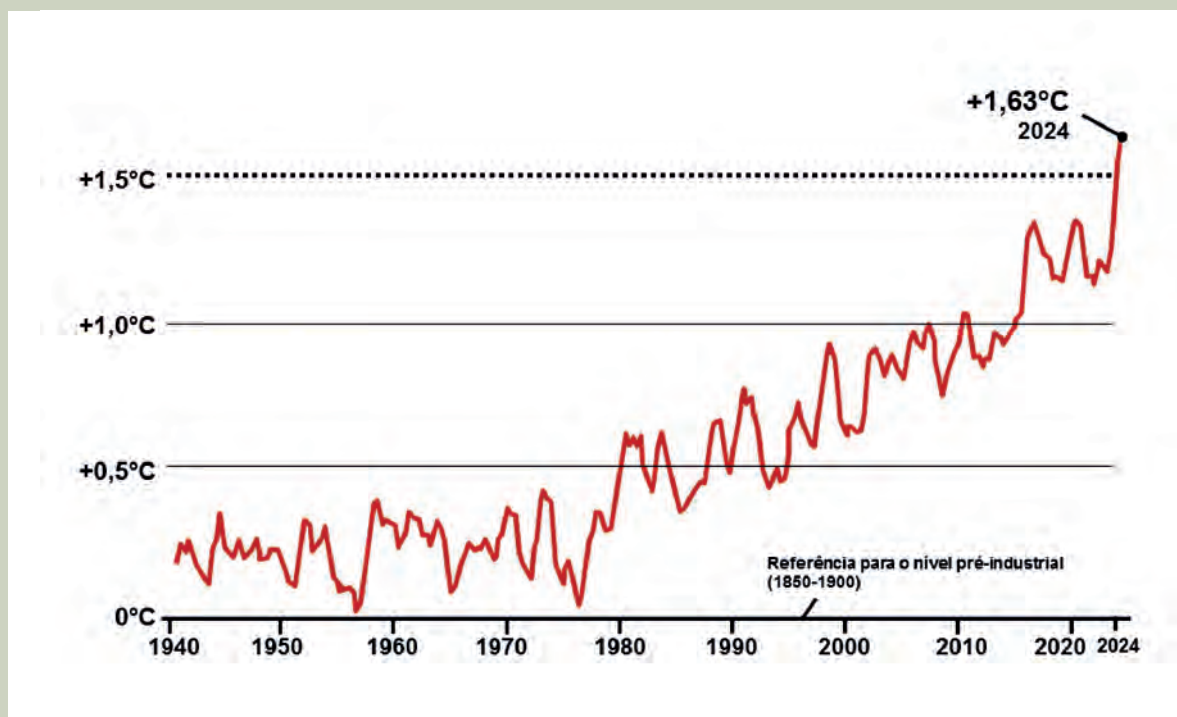
mostrava um aumento consistente e rápido da concentração de CO₂ na atmosfera. Essa curva, hoje conhecida como curva de Keeling, foi continuada, posteriormente, tanto na estação de Manua Loa, como em outras estações de diferentes países, evidenciando que o teor de CO₂ já atingiu, em 2024, a marca de 424 ppm (IPCC/Noaa). Antes da Revolução Industrial, a concentração de CO₂ atmosférico era de cerca de 280 ppm, portanto, houve um significativo aumento de 144 ppm.

Por isso o esforço do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) tem sido o de mostrar que um aumento de temperatura de até 1,5°C (Figura 4) ainda permitiria certa capacidade de resposta

adaptativa. Porém, as emissões de GEEs (gases de efeito estufa) não estacionaram e o aumento da temperatura média da superfície da Terra, em 2024, foi de 1,64°C, ultrapassando o limiar de segurança de 1,5°C estabelecido pelo Acordo de Paris na COP21 (Conferência das Partes), ocorrida em 2015.

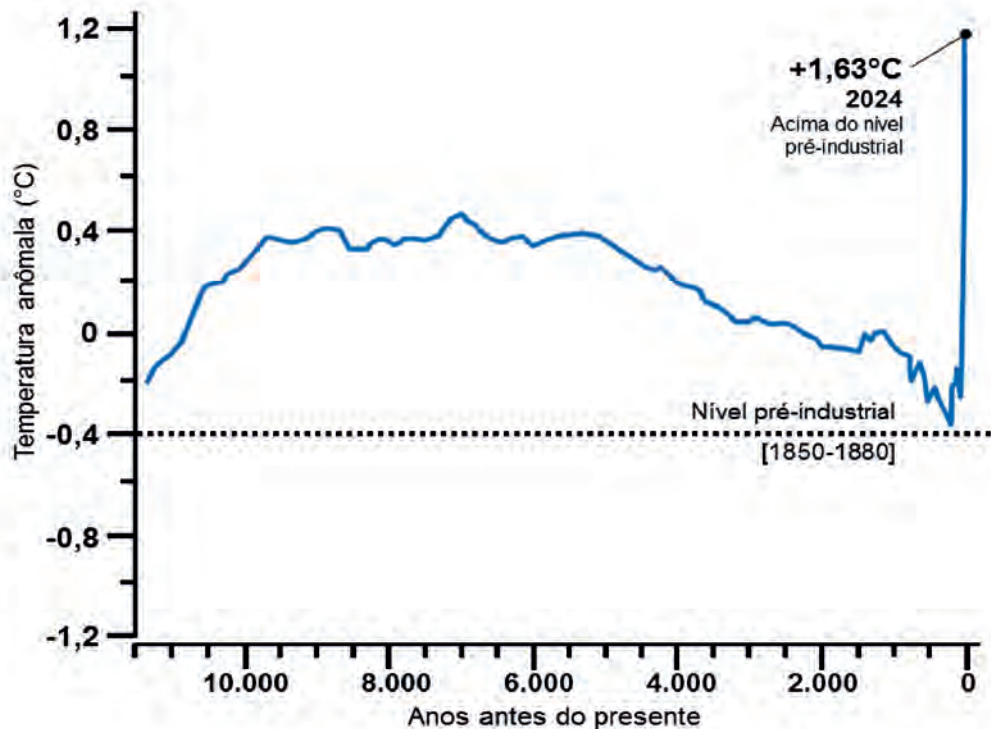
O aumento da temperatura global superior a 1,5°C pode causar mudanças significativas na vida planetária. No entanto, por ser um valor aparentemente pequeno, ele parece não apresentar perigo. Isso porque, no cotidiano da vida, um aumento de 1,5°C na temperatura da água do chá ou do chimarrão não implica grande diferença. Porém, o mesmo não ocorre quando se considera a escala planetária. Nesse caso, um

Figura 4. Aumento da temperatura média superficial da Terra em relação ao nível pré-industrial (1850-1880). Observe a aceleração a partir dos anos 1980. O valor de 0°C corresponde à referência de temperatura do período pré-industrial (1850-1900).



Fonte: ERA 5 1940-2024.

Figura 5. Curva de anomalia de temperaturas do Holoceno (últimos 11.700 anos).



Fonte: Marcot et al., 2013.

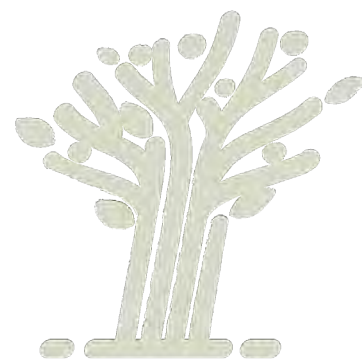
pequeno aumento na média da temperatura da superfície necessita de grande quantidade de energia, dada a grande massa de água, rochas e gases que formam essa superfície. A medição da temperatura média superficial da Terra, para as áreas oceânicas, considera o primeiro metro de água. Então, se hipoteticamente pudéssemos recolher em um gigantesco tacho esse primeiro metro de água de todos os oceanos e aquecê-lo para que sua temperatura suba 1,5°C, passaríamos a ter uma ideia da enorme quantidade de energia necessária para tanto. Pois é essa energia que foi adicionada no sistema do clima da Terra pelas emissões de gases de efeito estufa pelas principais economias, desde a Revolução Industrial da segunda metade do século XIX.

Outra forma de estimar o significado da adição de 1,5°C na temperatura superficial planetária é comparando o valor atual com os valores da curva de paleotemperatura do Holoceno, que corresponde aos últimos 11.700 mil anos (Figura 5). Essa curva, elaborada em 2013 pelo professor Shaun Marcot e equipe, é uma das mais importantes aquisições científicas da paleoclimatologia, pois sintetiza as mudanças climáticas do passado recente da Terra com grande precisão. Os paleoclimatólogos utilizam-se de muitos dados derivados do registro geológico, como fósseis, rochas e testemunhos de gelo, para construir essa curva. Nela, vê-se claramente que o aumento de temperatura de 1,63°C acima do nível pré-industrial é 0,8°C maior que a temperatura máxima do Holoceno,



“Em 2050,
estima-se
que a
população
mundial
alcance a
cifra de
9,7 bilhões de
habitantes,
dos quais
quase 70%
vivendo em
cidades.”

Lucas Leffa/Secom-PR



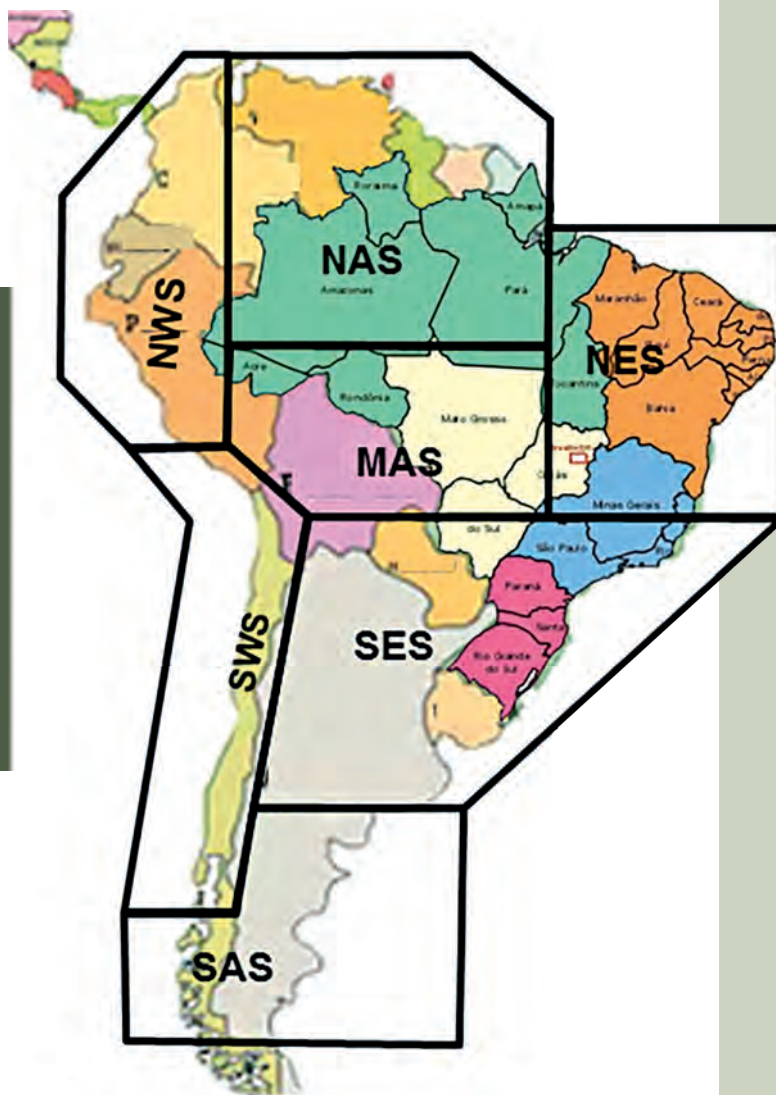
que ocorreu em torno de 7.000 atrás. O valor de zero grau, nesse gráfico, é considerado como sendo a temperatura atual. Esta corresponde à média das temperaturas superficiais do intervalo de 1960 a 1990. O gráfico mostra ainda que, no nível pré-industrial do final do século XIX, a temperatura estava $-0,4^{\circ}\text{C}$ abaixo da atual, sendo esse o marco para calcular o aumento global. Essa curva também evidencia que a taxa de elevação da temperatura verificada nos últimos 150 anos não tem precedentes, sendo facilmente visualizada pela reta quase vertical à direita do gráfico, onde zero indica o ano de 2024.

Analizando a curva de Marcot e equipe, podemos extrair, ainda, importantes inferências. Vejamos: se em toda a época do Holoceno não houve nenhum fator ou forçante climática que elevasse a temperatura média superficial do planeta para valores símiles ao atual, pode-se inferir que houve a introdução de um novo fator para produzir esse aumento que inexistiu no tempo anterior. Essa forçante é claramente identificada como sendo devida às emissões de gases de efeito estufa (GEEs), principalmente de CO_2 fóssil.

No ano de 2023, a emissão total de GEEs foi de 53 bilhões de toneladas de CO_2 equivalente. Desse total, 73,7% corresponderam à emissão de CO_2 fóssil. Os cinco maiores emissores são China (30,1% do total), EUA (11,3%), Índia (7,8%),

Figura 6. As sete sub-regiões climáticas da América do Sul (AS) segundo o IPCC (WR5): SAS (Sul da AS); SWS (Sudoeste da AS); SES (Sudeste da AS); MAS (Monçônica da AS); NES (Nordeste da AS); NWS (Noroeste da AS); NAS (Norte da AS).

Fonte: Modificado de Iturbide et al., 2020.



União Europeia (6,1 %) e Rússia (5,0%). O Brasil (2,5% do total) é o sexto maior emissor de CO₂, devido principalmente à queima de florestas.

A avaliação de como cada região planetária contribui para a emissão de gases de efeitos estufa e como os impactos das mudanças climáticas nela se verificam tem sido feita em detalhe pelos cientistas do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima) desde 1988, quando esse organismo foi constituído. Uma nova geografia do clima foi definida de modo que os continentes e oceanos foram delimitados em termos de regiões de referência climática. O vasto território do Brasil inclui-se em quatro regiões da América do Sul (AS), sendo do sul para o norte: Sudeste da América do Sul (inclui o RS, SC, PR, RJ e parte de MS, SP, MG e ES), Nordeste da América do Sul, Monções Sul-Americanas e Norte da América do Sul (Figura 6).

O cenário para a região climática Sudeste da América do Sul (SES), publicado pelo IPCC (2023), indica aumento da temperatura média, do calor extremo e da precipitação anual média, bem como o aumento de inundações e precipitações severas. Também está previsto o aumento do nível do mar relativo, inundações e erosão costeira, onda de calor marinha e acidificação do oceano.

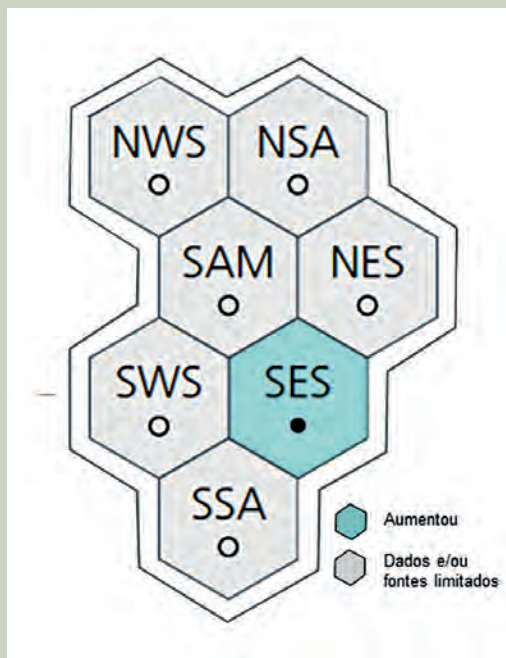
Esses são alguns indicadores básicos das mudanças previstas e já observadas. Porém, como vimos, a mudança climática altera os ecossistemas e seus limites, bem como a

extensão de geleiras e florestas, campos e banhados, assim como a disponibilidade de água, entre outras modificações. Pode-se, assim, avaliar os perigos, vulnerabilidades e riscos para cada região e seus ecossistemas, bem como para suas comunidades humanas urbanas, rurais e tradicionais.

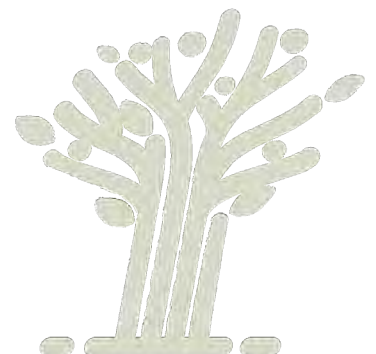
A emergência climática e os novos limites: a importância do fator local

As mudanças climáticas emergiram na discussão pública no final dos anos 1980. Um dos eventos marcantes dessa visibilização foi quando um dos mais destacados cientistas do clima da atualidade, James Hansen [1941-...], então diretor do Goddard Institute for Space Studies da Nasa, fez um depoimento como testemunha na comissão sobre o clima do Senado dos EUA. Em 1988, ele afirmou peremptoriamente que o "aquecimento global está em curso". A assertiva teve como base os modelos climáticos que não só reproduziam o registro histórico de temperatura, mas também faziam previsões de mudanças climáticas para o futuro com precisão sem precedentes.

Figura 7. Mudanças na precipitação intensa observadas nas regiões de referência da América do Sul (indicadas por hexágonos) desde a década de 1950. A região Sudeste (SES), em que se inclui o RS, é a única em que se verifica claramente um aumento da intensidade das precipitações.

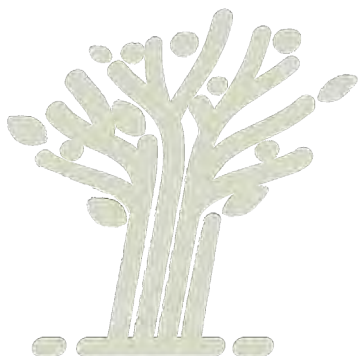


Fonte: IPCC, 2023.





Alagamento na
Região Metropolitana
de Porto Alegre.



“O aumento da
temperatura global
superior a 1,5°C pode
causar mudanças
significativas na vida
planetária.”

Além dos dados calcados na física básica, o professor Hansen valeu-se de pesquisas detalhadas de testemunhos geológicos de gelo e de registros de isótopos estáveis para restringir e confirmar a sensibilidade do modelo que estava construindo. Com isso, ele foi um dos primeiros a reconhecer o perigo de atravessar o ponto de inflexão do sistema do clima, que é aquele em que as mudanças passam a ser irreversíveis e criam um planeta diferente daquele no qual a civilização se desenvolveu. Em outras palavras, ele alertava para o fato de que, embora os humanos possam definir as fronteiras de seus países, é o clima que define as fronteiras da natureza. E, nesse caso, a nova fronteira do clima é de um tipo tal que nunca foi experimentada na história das civilizações e elas podem dissolver as fronteiras históricas dos humanos.

O lugar em que vivemos passa a ser importante para entender o perigo e os riscos das populações frente à emergência climática. As discussões atuais precisam se deslocar rapidamente para entender a relação das atividades humanas com seus ecossistemas e geossistemas locais. O estudo e a gestão dos perigos, das vulnerabilidades e dos riscos locais passam a ser centrais na estratégia de sobrevivência humana e na construção de uma cultura de adaptação às mudanças em curso.

Nos últimos 50 anos, grande parte das atividades humanas que modificaram de forma acelerada o ambiente urbano, rural e natural foi sendo realizada sem considerar a influência que teria sobre o sistema do clima. Com as mudanças em curso, parte dessas atividades e suas infraestruturas, incluindo habitações, pode agora estar no caminho de fluxos mais intensos da água, de movimentos de massa e dos ventos. É hora, como disse o cientista James Lovelock, de uma retirada estratégica, de revermos nosso lugar no mundo e termos um planejamento sustentável e seguro para os próximos anos.

Fator local e contextos da produção da catástrofe no Rio Grande do Sul

A catástrofe ocorrida em maio de 2024 no Rio Grande do Sul foi a primeira que ocorreu em uma escala regional, com diferentes tipos de riscos de acordo com cada região, por isso requer que seja bem estudada e descrita. Esta é a função deste livro: apresentar os estudos avançados que estão em curso para entender a emergência climática no estado do Rio Grande do Sul. Ele foi feito a partir de diversos grupos de pesquisadores de nossas universidades, que mostram a força e a conexão da ciência sul-riograndense com a sociedade.

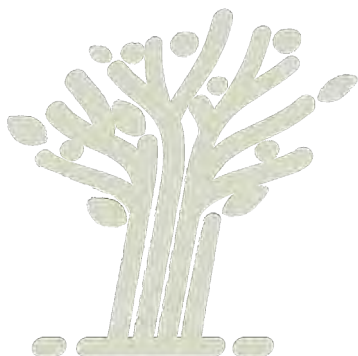
Mas, antes de concluir este texto, vamos rever os principais elementos que produziram essa catástrofe, chamada nos canais de grande difusão de "enchente" ou "tragédia" do Rio Grande do Sul. Com efeito, ela constituiu-se na maior catástrofe hidrogeoclimática e socioambiental de uma região metropolitana do Hemisfério Sul. Por essa razão, ela serve de aviso às comunidades nacional e global. Esse desastre foi produzido por um conjunto complexo de fatores. O fator meteorológico foi um dos mais importantes fatores. A chuva intensa de cerca de 800 mm que caiu na região nordeste e central do Rio Grande do Sul em apenas cinco dias deveu-se a uma configuração particular das condições meteorológicas (Figura 8).

Mas, além desse fator, outros cinco fatores concorreram fortemente para agravar os impactos socioambientais da catástrofe e precisam ser considerados, como faremos brevemente a seguir.

A estrutura geológica-geomorfológica e hidrográfica do Rio Grande do Sul constituiu-se no segundo fator a ser considerado e,



Figura 8. Configuração meteorológica. A umidade originada no Atlântico (1) foi levada pelos ventos alísios continente adentro, agregando-se à umidade da Floresta Amazônica (2). Os ventos conduziram-na para o sul, onde se formou um corredor de umidade (3) entre uma frente fria (5) e um centro de alta pressão (4) estacionado na região Sudeste do Brasil, ocasionando uma precipitação de 800 mm em poucos dias.



juntamente com o contexto meteorológico, foi fundamental para a produção da catástrofe. Vejamos: a precipitação mais intensa ocorreu nas terras altas do Planalto Meridional, no nordeste do Rio Grande do Sul, onde se situam as cabeceiras dos principais rios da Região Hidrográfica do Lago Guaíba. A partir dessa região, com elevação de até mil metros, as águas escoaram rapidamente para os principais canais fluviais (Figura 9).

Esses rios encontram-se em vales profundos e estreitos, tipo cânions, como o do Alto Jacuí, Taquari-Antas (que desemboca no Baixo Jacuí), Caí, Sinos e Gravataí (Figura 10). As águas desses rios convergem para as terras baixas da Depressão Periférica até o delta do Jacuí. Dali, elas escoam para o Lago Guaíba, que se conecta com a Laguna dos Patos, e esta, ao Atlântico. Tanto o delta como o sistema de lagos e lagoas costeiras atuam como atenuadores do fluxo, inclusive bloqueando-o. Em tempos normais, a água extravasa do Guaíba para a Laguna dos Patos e, depois para o Atlântico.

Mas, quando ocorrem tempos severos, formam-se marés de tempestade na desembocadura da Laguna dos Patos, em Rio Grande. As águas da Laguna e do Lago Guaíba não escoam e se acumulam na região deltaica do delta do Jacuí. Formou-se ali um imenso lago de inundação deltaica que ocupou nesse evento uma área de cerca de 800 km², impactando mais de quatro milhões de pessoas que vivem na Região Metropolitana de Porto Alegre (Figura 11).

A inundação foi predominante nas terras baixas da Depressão Periférica e da Planície Costeira. Contudo, nos vales profundos, como o do Taquari-Antas, o nível da água subiu em torno de 30 m, transformando-os em fluxos



Figura 9. A enorme precipitação ocorreu no Planalto Meridional (área vermelha), escoando por vales profundos até as terras baixas da Depressão Periférica e acumulando-se no delta do Jacuí, na Região Metropolitana de Porto Alegre. Dali, o escoamento seguiu vagarosamente pelo Lago Guaíba e, depois, pela Lagoa dos Patos até o Oceano Atlântico.

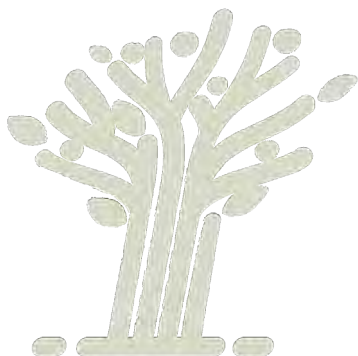
torrenciais de alta velocidade. Além disso, esses fluxos densificaram-se com a enorme carga de cascalho, areia e lama derivada da erosão do solo das terras altas do planalto e do deslizamento de massa das encostas. Os fluxos tiveram a força de erodir cidades, como ocorreu, entre outras, em Arroio do Meio.

Os serviços ecossistêmicos e o escoamento da água constituem o terceiro fator. Eles dizem respeito às condições em que a água escoar sobre a superfície, desde as cabeceiras até a desembocadura dos rios que afluem para o Lago Guaíba. Se esses serviços – como rios, matas ripárias, campos naturais e banhados – encontram-se bem conservados, eles podem atuar na diminuição da velocidade



Entorno do Aeroporto
Internacional Salgado Filho,
em Porto Alegre.

“A grande estratégia
para o futuro não é a da
reconstrução feita com base
nas ideias prepotentes
do século XX,
que nos trouxeram
até aqui.”



e do volume da água. Banhados e matas, por exemplo, são importantes para a retenção e infiltração da água no subsolo. Por outro lado, se os serviços ecossistêmicos foram suprimidos, a água escorre com velocidade e quantidade maiores, aumentando a erosão. Nos últimos 20 anos, houve intensificação da monocultura, especialmente da soja, em grande parte dessa região hidrográfica, com consequente supressão dos serviços ecossistêmicos. Esse processo deu-se, também, com o enfraquecimento das leis ambientais que protegiam esses serviços.

O sistema de gestão territorial e ambiental foi sendo desconstituído. Importantes órgãos de gestão, como a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (Sema) e a Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Porto Alegre (Smam) foram desestruturadas e incorporadas em outras secretarias.

Além disso, o crescimento das cidades também ocorreu mediante a continuada ocupação de terras ribeirinhas e áreas alagadiças, graças ao relaxamento de medidas protetivas dos planos diretores urbanos. Esse aspecto proporcionou o aumento da exposição de populações ao risco de inundações. O planejamento adequado da ocupação e cobertura do solo teria sido fundamental para a diminuição de riscos.

A infraestrutura e a inteligência do Estado para enfrentar desastres formam o quarto fator. Trata-se de saber as condições da infraestrutura do Estado e dos municípios para enfrentarem o cenário catastrófico. Um exemplo tornou-se bastante emblemático para mostrar como houve enfraquecimento da capacidade de resposta a desastres no último período. O robusto sistema de proteção contra inundações de Porto Alegre, constituído por 68 km de diques e 24 casas de bombas, não funcionou por falta de manutenção nas comportas.

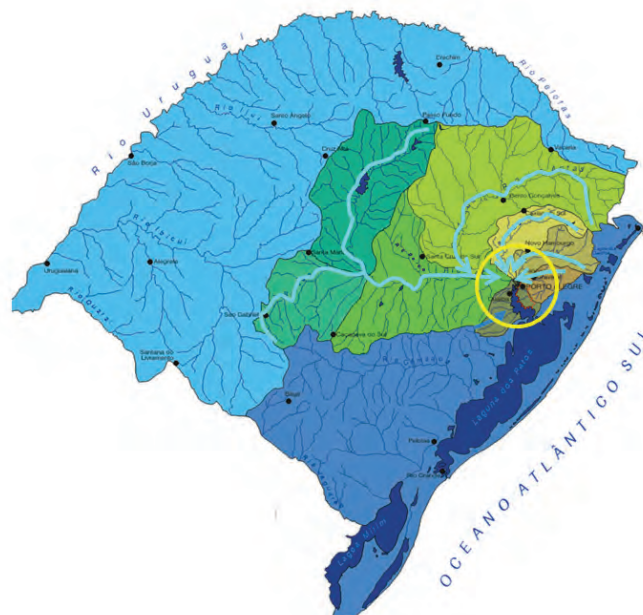


Figura 10. A precipitação intensa que ocorreu no norte da Região Hidrográfica do Guaíba (identificada pelas cores verde-amareladas) convergiu para o delta do Jacuí e o Lago Guaíba.

Fonte: Modificado de Menegat, 2024.

Além deste, somam-se outros aspectos que enfraqueceram a governança da infraestrutura, como o sucateamento continuado e posterior privatização da Companhia Estadual de Energia Elétrica (Ceee). Órgãos importantes do Estado foram extintos, como a Fundação Zoobotânica e a Fundação de Economia Estatística, entre outras, suprimindo os núcleos de inteligência estratégica do planejamento. Isso contribuiu para que a gestão do desastre ocorresse de forma insuficiente.

A Defesa Civil e os planos de preparação e gestão da emergência representam o quinto fator. Embora tenha ficado evidente o esforço heroico de salvar milhares de vidas, o socorrismo se colou como único recurso na gestão da emergência, uma vez que falharam o sistema de alerta e a preparação. Desastres produzidos por inundações não são de todo

imprevisíveis. Por um lado, porque eles têm ocorrido com frequência, embora em magnitude menor, como a enchente de 2015 e a de 2023. Por outro, porque temos conhecimentos armazenados nos centros de pesquisa das universidades. Também há boas experiências de organização de defesa civil no país.

Por fim, o sexto fator diz respeito à educação e à inteligência social para enfrentar situações de emergência climática. Se não há organização e informação prévia das comunidades de como devem atuar frente a uma emergência, os impactos serão sempre maiores. Além disso, é importante a educação geral de temas geográficos, geológicos e sobre mudanças

climáticas e ambientais. Os currículos das escolas devem desenvolver esses temas enfatizando o conhecimento e a percepção do lugar onde as pessoas vivem.

Do ensino universitário ao fundamental, faz-se necessário entrar em outro ciclo educativo: aquele que prepara a juventude e os futuros profissionais para a emergência climática. São eles, os jovens, que vão construir as soluções para o futuro. Para tanto, programas de extensão que construam conhecimento no contexto de seu uso, estabeleçam redes de ciência cidadã para coleta de dados e contribuam com os municípios e comunidades para mapearem suas vulnerabilidades e

Figura 11. Nesta imagem de satélite do dia 06/05/2024 evidencia-se o fluxo carregado de lama e detritos. Na região do delta do Jacuí formou-se um grande lago de inundação deltaica, afetando toda a Região Metropolitana.

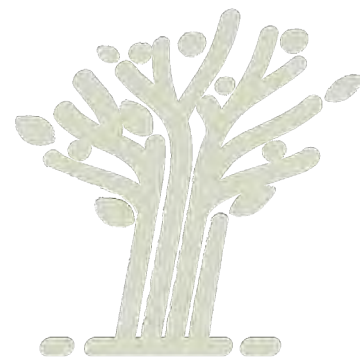


Fonte: Modis – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, satélites Terra e Aqua da Nasa.

estabeleçam planos de gestão de risco são fundamentais. As universidades e escolas possuem um papel crucial nesse momento, pois são essas comunidades de conhecimento que podem construir uma inteligência social do lugar de sorte a estabelecer elos entre as mudanças climáticas e seus impactos em cada bacia hidrográfica.

Reconstruir melhor que antes: soluções baseadas na natureza e geoética

A grande estratégia para o futuro não é a da reconstrução feita com base nas ideias prepotentes do século XX, que nos trouxeram até aqui. Diferente disso, devemos pensar na ideia chave da regeneração dos ecossistemas e bacias hidrográficas, desde as nascentes até as desembocaduras dos rios. Considerar o conjunto ecológico e paisagístico onde vivemos tornou-se crucial. Igualmente a regeneração das cidades, que devem ser menos parasitárias em termos energéticos e alimentares. O tecido urbano deve incluir tramas de corredores ecológicos e áreas de minibusques, que funcionam como esponjas e ajudam a regenerar os ecossistemas onde as cidades estão encravadas. Importante, ainda, é a regeneração das comunidades, impactadas por uma catástrofe que interrompeu suas rotinas, atividades econômicas e laços construídos ao longo do tempo. Por fim, devemos considerar os limites geoéticos para habitar a Terra na época do Antropoceno. Como disse um sábio líder indígena: “não podemos tomar o lugar que é da água”, pois as consequências podem ser muito severas.



Referências

- ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 41, 1896, p. 237-276.
- CRUTZEN, P. J. Geology of mankind. *Nature*, v. 425, n. 3, 2002, p. 23.
- EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE, CRIPPA et al. *GHG emissions of all world countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897,JRC138862>
- FERNÁNDEZ-ARMESTO, F. *Civilizations*. London: McMillan, 2000.
- HANSEN, J. *Storms of my grandchildren*. The truth about the coming climate catastrophe. New York: Bloomsbury, 2009.
- IPCC. *Climate Change 2023: synthesis report*. Contribution of working groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland: 2023, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- ITURBIDE, M.; GUTIÉRREZ, J. M.; ALVES, L. M. et al. *An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: definition and aggregated datasets*, Earth Syst. Sci. Data, 12, 2020, p. 2959-2970. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-12-2959-2020>.
- LOVELOCK, J. *Gaia, a prática científica da medicina planetária*. Lisboa: Instituto Piaget, 1992.
- MARCOTT, S. A. et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, v. 339, 2013, p. 1198-1201.
- MENEGAT, R.; FONTANA, R. C. Gigantic cities and the new challenge of an old science: geoethics, geoeducation, and geoknowledge in Porto Alegre, Brazil. ACEVEDO, R. D.; FRÍAS, J. M. (Eds.). *Geoethics in Latin America*. Springer Nature, 2010, p. 59-100.
- MENEGAT, R. *Cognição e paisagem no processo civilizatório andino: a matriz do lugar como chave para decifrar Machu Picchu*. *Revista Brasileira de Horticultura Ornamental*, v. 16, n. 1, 2010, p. 41-45.
- ROCKSTRÖM, J. Pontos de inflexão e processos realimentados. THUNBERG, G. *O livro do clima*. São Paulo: Companhia das Letras, 2022, p. 32-40.
- UNITED NATIONS. *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9. New York: United Nations, 2024.
- WEART, S. *The discovery of global warming*. Massachusetts: Harvard Univ. Press, 2003.





A cheia de 2024 no Rio Grande do Sul

FERNANDO MAINARDI FAN
WALTER COLLISCHONN
RODRIGO CAUDURO DIAS DE PAIVA
ANDERSON RUHOFF





RESUMO

Chuvas intensas e prolongadas, nos meses de abril e maio de 2024, desencadearam, no Rio Grande do Sul, o que pode ser considerado o maior desastre hidrológico já ocorrido no Brasil. O evento extremo se manifestou de quatro formas principais: movimentos de massa nas áreas serranas, enxurradas rápidas nos rios que conectam as serras às planícies, inundações lentas e prolongadas em áreas densamente povoadas próximas aos rios de planície e em torno da Laguna dos Patos, com impactos acentuados, em várias cidades, por falhas dos sistemas de proteção contra cheias. Mais de 15.000 km² de planícies junto aos rios foram inundados em todo o Rio Grande do Sul. Neste artigo são descritos os fenômenos hidrológicos que resultaram no desastre de 2024, partindo de uma descrição geográfica da região mais atingida, análise das chuvas, descrição da progressão das cheias e das falhas nos sistemas de proteção contra cheias que agravaram o desastre.



Lucas Leffa/Secom- PR

Alagamento na Região Metropolitana, entre Porto Alegre e Canoas.

1. O maior desastre hidrológico da história do Rio Grande do Sul

Nos meses de abril e maio de 2024, chuvas intensas e prolongadas desencadearam o que, em termos de número de pessoas atingidas e de prejuízos socioeconômicos, pode ser considerado o maior desastre de origem hidrológica já ocorrido no Brasil em comparação com outros eventos registrados (Zanandrea *et al.*, 2023; Collischonn *et al.*, 2025).

O evento hidrológico, decorrente das chuvas intensas, se manifestou de quatro formas

principais: 1) movimentos de massa nas áreas serranas; 2) enxurradas rápidas nos rios que conectam as serras às planícies; 3) inundações mais lentas e prolongadas em áreas densamente povoadas próximas aos rios de planície, com impactos acentuados, em várias cidades, por falhas dos sistemas de proteção contra cheias; e 4) inundações lentas nas margens da Laguna dos Patos.

Na região da encosta da serra o volume de chuvas foi tão grande que resultou no maior evento de movimentos de massa já documentado no país (Cemaden, 2024; Andrades Filho *et al.*, 2024).

Ao longo dos Rios Jacuí, Pardo, Taquari, Caí e Sinos (Figura 1) e vários de seus afluentes, foram registradas as maiores cheias desde o início das observações, o que corresponde a mais de 150 anos em alguns casos. No sistema formado pelo Guaíba e pela Laguna dos Patos também ocorreram os maiores níveis da água já observados (Collischonn *et al.*, 2025).

Mais de 15.000 km² de planícies junto aos rios foram inundados em todo o Rio Grande do Sul, impactando diretamente centenas de milhares de pessoas. O número de pessoas desalojadas pelas cheias e movimentos de massa em todo o estado chegou a 877.729, segundo o Mapa Unificado do Plano Rio Grande divulgado pelo Governo Estadual (Rio Grande do Sul, 2024a). O número de mortes confirmadas chegou a 183, com outras 27 pessoas ainda desaparecidas sete meses após o ocorrido (Collischonn *et al.*, 2025). Uma avaliação dos prejuízos realizada pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) estimou em 89 bilhões de reais os efeitos econômicos do desastre (BID, 2024).

O objetivo deste capítulo é descrever o desastre de 2024 no Rio Grande do Sul, sob o ponto de vista hidrológico, partindo de uma descrição geográfica da região mais atingida, seguida de uma análise da chuva ocorrida entre abril e maio de 2024, além da descrição da enchente resultante nos rios que drenam para os Rios Jacuí e Guaíba, e posteriormente da descrição da cheia na Laguna dos Patos. Nesse contexto, este capítulo resume análises aprofundadas descritas em artigos científicos sobre a chuva (Collischonn *et al.*, 2024a; Reboita *et al.*, 2024) e sobre as cheias, inundações e seus impactos (Collischonn *et al.*, 2025).

2. O Rio Grande do Sul é particularmente suscetível a cheias rápidas e intensas

O Rio Grande do Sul é dividido em duas grandes bacias hidrográficas principais: a Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai e a Bacia Hidrográfica da Laguna dos Patos (Figura 1).

Na metade norte do Rio Grande do Sul, onde as altitudes chegam a mais de 1.000 metros, estão as cabeceiras de diversos rios que seguem para o Rio Uruguai e de outros que seguem na direção da Laguna dos Patos. A declividade do leito da maioria dos rios que se originam na metade norte do estado é muito elevada. Além disso, em boa parte dessa região os solos são relativamente rasos e argilosos, com capacidade de armazenamento de água relativamente baixa, comparada com o volume das precipitações intensas da região (Paiva *et al.*, 2024), e as rochas basálticas sob o solo são pouco permeáveis.

A combinação da alta declividade dos rios com os solos de pouca capacidade de absorver a água da chuva por infiltração favorece a ocorrência de enchentes muito intensas e rápidas, em que o nível da água e a vazão dos rios pode aumentar muito em um tempo relativamente curto. Os rios da metade norte do Rio Grande do Sul se destacam em todo o Brasil como aqueles em que ocorrem as maiores variações de nível da água em 24 horas (Miranda *et al.*, 2024) e pelas elevadas vazões durante as cheias (Paiva *et al.*, 2024). Em rios dessa região, como o Taquari e seus afluentes, há diversos registros de elevações do nível da água de mais de 10 metros em menos de 24 horas (Collischonn *et al.*, 2020; Collischonn *et al.*, 2025).

Na Bacia Hidrográfica do Guaíba, esses rios de alta declividade, que correm no sentido norte-sul, atingem o Rio Jacuí, que escoar ao longo da

Depressão Central, uma extensa região de baixas altitudes que se estende de oeste a leste ao longo de quase todo o estado. Na transição entre as montanhas, localizadas mais ao norte, e a planície da Depressão Central, o Rio Jacuí e seus afluentes mais importantes passam a inundar áreas cada vez maiores junto às margens durante as cheias. Inicialmente as planícies inundáveis adjacentes aos rios têm apenas algumas dezenas ou centenas de metros de largura, mas à medida que os rios avançam pela planície, a largura da área inundável cresce até valores superiores a 10 km.

Na porção central da bacia, no entorno do baixo Rio Jacuí, as planícies de inundação são zonas naturalmente baixas para onde as águas

das subidas dos rios se direcionam durante a ocorrência de eventos de cheia. Por armazenarem as águas das cheias e manterem a velocidade dos fluxos relativamente baixas, a existência das planícies faz com que, durante esses eventos, a elevação do nível da água dos rios ao longo da Depressão Central ocorra mais lentamente do que nos rios nas áreas mais montanhosas. Da mesma forma, a velocidade de descida do nível da água depois da passagem do pico da cheia é muito mais lenta no Rio Jacuí do que nos rios que descem das montanhas. Em outras palavras, as planícies inundáveis adjacentes ao Rio Jacuí e seus afluentes, transformam as cheias rápidas e de grande amplitude (variação de nível da água) dos rios das montanhas em cheias de amplitude

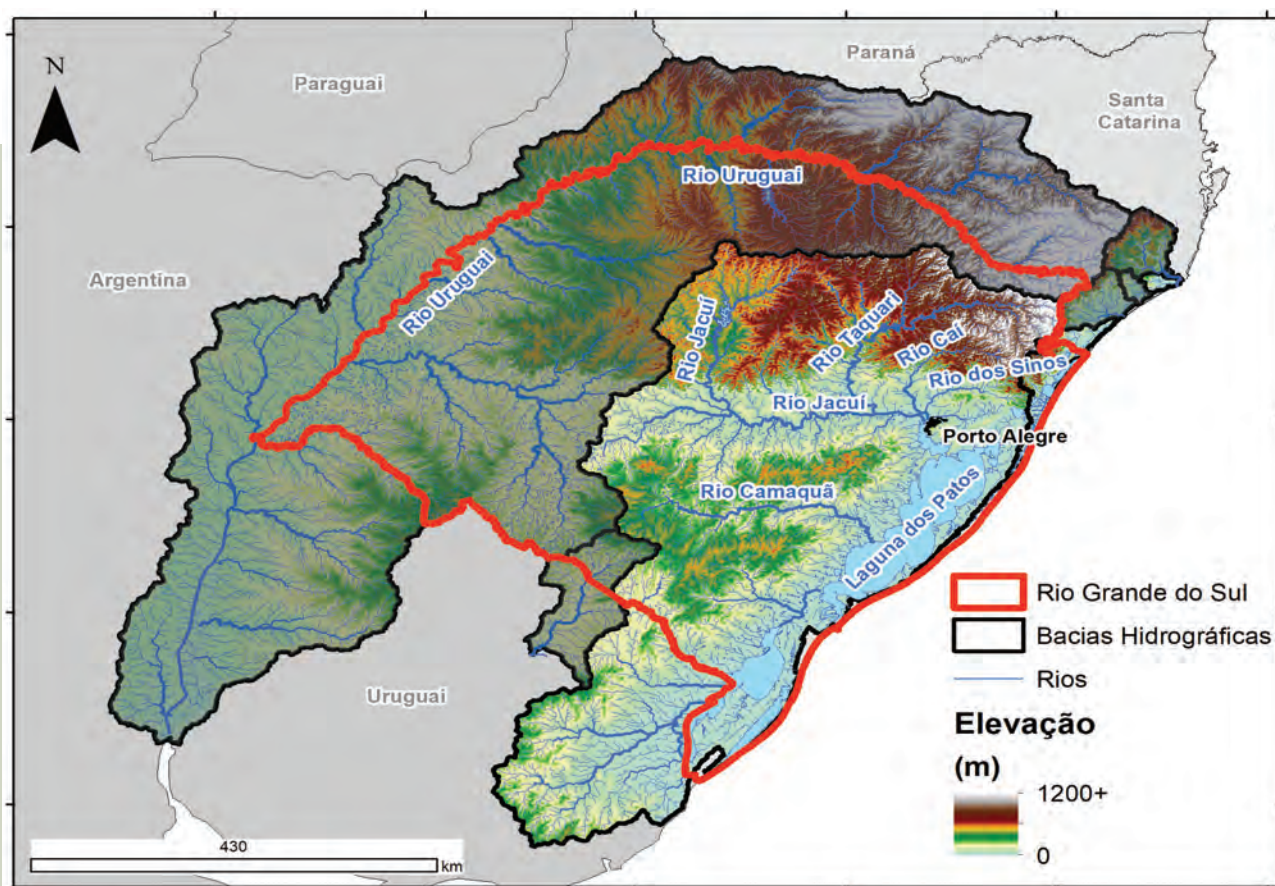


Figura 1. Bacias hidrográficas e o estado do Rio Grande do Sul, com destaque para os Rios Jacuí, Taquari, Caí, Sinos e Camaquã, e para a Bacia Hidrográfica da Laguna dos Patos, onde ocorreu o maior desastre hidrológico da história do estado.

menor, mas com grande duração. Enquanto nos rios de maior declividade o nível da água pode se elevar em 10 metros, ou mais, em 24 horas, no Rio Jacuí as maiores elevações em 24 horas não passam de 2,5 metros, e no Guaíba, em Porto Alegre, são da ordem de um metro. Por outro lado, as cheias que duram de um a dois dias nos rios que deixam as montanhas podem se transformar em cheias que duram semanas nos rios da planície, como o Jacuí e o Guaíba.

Na Laguna dos Patos, que recebe a vazão do Guaíba e de diversos outros afluentes, o processo de enchente é ainda mais lento, e a amplitude de elevação do nível é ainda menor. Por outro lado, os níveis d'água do Guaíba e da Laguna dos Patos podem ser influenciados pelos ventos, com variações na escala de horas que chegam a 50 cm em dias de ventos fortes e persistentes (Possa *et al.*, 2022; Lopes *et al.*, 2018).

No processo de ocupação do Rio Grande do Sul, diversas cidades surgiram ao longo dos vales dos Rios Caí, Sinos, Taquari e Jacuí. Da mesma forma, algumas cidades encontram-se em torno da Laguna dos Patos e do Guaíba, incluindo a capital, Porto Alegre. Nessas cidades há registros históricos de cheias que antecedem o início do monitoramento sistemático dos rios. A cidade de Porto Alegre, por exemplo, sofreu com cheias diversas sobre as quais existem registros pelo menos desde 1873 (Guimaraens, 2025; Torres, 2012).

Até recentemente, a maior cheia já observada em grande parte das localidades da Bacia Hidrográfica do Guaíba havia sido a cheia de 1941, que foi especialmente intensa nos Rios Jacuí e Taquari e em Porto Alegre, onde as águas atingiram o nível de referência de 4,75m (Guimaraens, 2025; Silveira *et al.*, 2023; Possa *et al.*, 2022). A cheia de 1941 também era, até maio de 2024, a maior cheia já registrada nas cidades nas margens da Laguna dos Patos, como Pelotas e Rio Grande (Torres, 2012).

3. A maior chuva já observada no país

O desastre de 2024 foi causado por chuvas com uma combinação de magnitude, duração, intensidade e abrangência espacial que jamais foi observada no Brasil (Collischonn *et al.*, 2024a).

Os fatores meteorológicos causadores da chuva foram analisados por Reboita *et al.* (2024) e Marengo *et al.* (2024). Esses trabalhos destacam que a chuva foi formada por um intenso fluxo de umidade originada principalmente no Atlântico tropical, se deslocando sobre a Amazônia para o Sul e Sudeste do Brasil, através de jato de baixos níveis a leste dos Andes, combinado com um bloqueio atmosférico no sudeste do Oceano Pacífico. Essas condições favoreceram a ocorrência de frentes frias e de vários sistemas convectivos de mesoescala, que contribuíram para a formação de ventos, tornados, raios e, acima de tudo, chuva intensa. Nos dois trabalhos se destaca que o fenômeno El Niño pode ter contribuído para a formação das chuvas, embora já estivesse em fase final no mês de abril.

Na parte leste da Bacia Hidrográfica do Guaíba, na região dos Rios Sinos e Caí, o mês de abril apresentou chuvas próximas da média até o dia 28 de abril, enquanto a porção oeste da bacia do Rio Jacuí já havia registrado precipitações acima da média. Entretanto, a partir do dia 29 de abril, as chuvas se intensificaram em toda a região de contribuição para o Guaíba, e continuaram assim até o dia 5 de maio. Uma semana depois, nos dias 11 e 12 de maio, outro evento de chuva intensa afetou quase toda a região das bacias do Jacuí, Taquari, Caí e Sinos. Eventos de chuva intensa e volumosa seguiram ao longo do restante de maio e junho.

Conforme análise criteriosa de medições em pluviômetros da região, o período de chuva mais

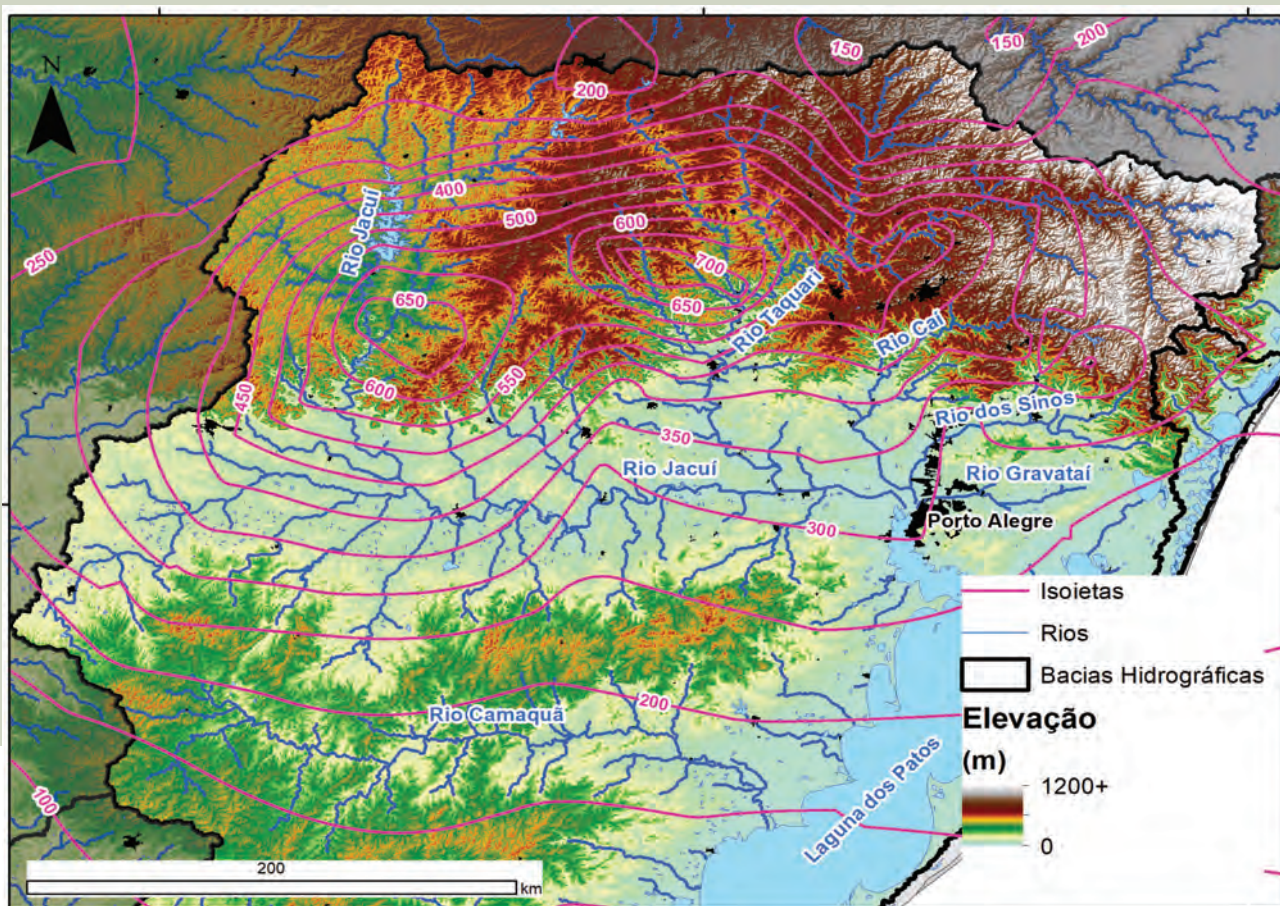


Figura 2. Mapa do volume de chuva acumulada no período de cinco dias entre 28 de abril e 2 de maio de 2024, onde cada linha rosada representa uma isoietas (linha sobre a qual os valores de chuva são constantes) de precipitação de 50 em 50 mm.

intensa ocorreu de 28 de abril até 2 de maio, com mais de 700 mm em alguns locais durante esses cinco dias. A chuva mais intensa ocorreu sobre a zona de transição entre o planalto e a planície das bacias dos Rios Jacuí e Taquari, onde se localiza o terreno mais íngreme, e que mais favorece a geração de escoamento rápido durante as chuvas, conforme mostra a Figura 2 (Collischonn *et al.*, 2024a).

A chuva que causou as cheias no Rio Grande do Sul em abril e maio de 2024 superou amplamente os maiores eventos de precipitação em grande escala no Brasil, no período em que estão disponíveis medições sistemáticas de

maior confiabilidade (1961 a 2022) (Collischonn *et al.*, 2024a). Conforme o mesmo estudo, se tivesse ocorrido nos Estados Unidos, a chuva extrema de 2024 no Rio Grande do Sul seria a segunda chuva mais intensa já observada naquele país, sendo superada apenas pela precipitação resultante do furacão Harvey em 2017 no Texas (Kunkel e Champion, 2019).

A questão de comparações entre a chuva que causou a cheia de 2024 com a chuva que causou a cheia de 1941 foi avaliada com base em dados de chuva medidos, e foi demonstrado, de forma clara e definitiva, que a chuva que causou a cheia de 2024 foi mais volumosa e intensa que a chuva

que causou a cheia de 1941 na Bacia Hidrográfica do Guaíba (Collischonn *et al.*, 2024b).

4. Cheias rápidas e movimentos de massa nos vales

A sequência de vários dias de chuva intensa e volumosa de centenas de milímetros saturou os solos, que, conforme mencionado antes, não são muito profundos e têm capacidade relativamente limitada de absorção de grandes volumes de água (Paiva *et al.*, 2024).

Nas regiões de altas declividades nas encostas dos vales, os solos saturados acabaram sofrendo movimentos de massa (escorregamentos e fluxos de detritos) em uma vasta área que se estende por cerca de 350 km de oeste a leste e aproximadamente 100 km de norte a sul. Mais de 15 mil áreas com movimentos de massa foram identificadas a partir de imagens de satélite (Cemaden, 2024; Andrades Filho *et al.*, 2024) e muitas outras foram identificadas em atividades de campo

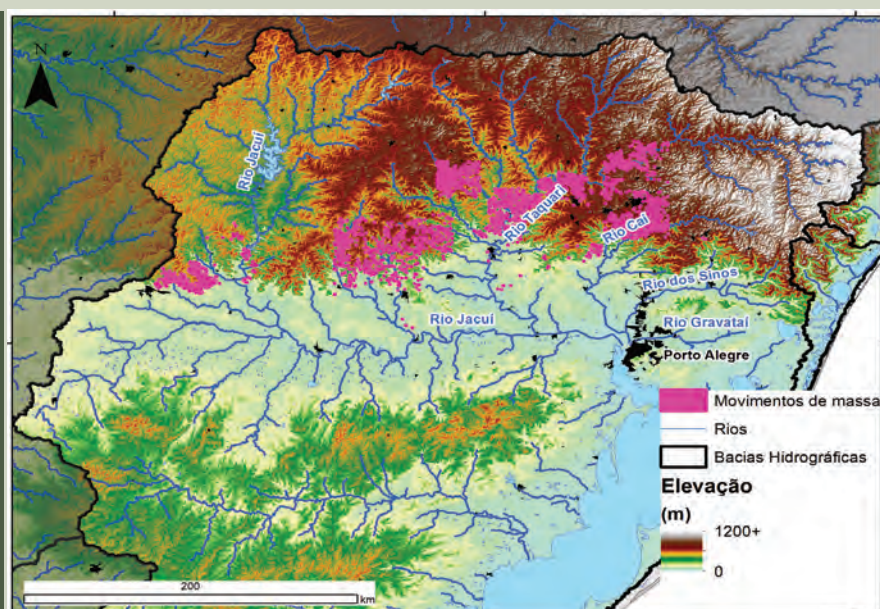
(Franck *et al.*, 2024; Kobiyama *et al.*, 2024).

As áreas em que ocorreram mais escorregamentos de encostas coincidem com as áreas de maiores totais de precipitação, conforme pode se observar na Figura 3.

As fortes chuvas também causaram a rápida elevação dos rios, iniciando pelos afluentes menores dos Rios Jacuí e Taquari, como os Rios Jacuizinho, Pardo, Pardinho e Forqueta. No Rio Forqueta, a vazão máxima nas barragens das Pequenas Centrais Hidrelétricas Rastro de Auto e Salto Forqueta, localizadas entre os municípios de Putinga e São José do Herval, superou a capacidade máxima de descarga dos vertedores (Collischonn *et al.*, 2025).

A continuação das chuvas resultou na formação de cheias também nos rios maiores, como o Caí, o Taquari e o Jacuí. Uma análise comparativa revelou que as vazões máximas de diversos rios na bacia do Guaíba atingiram valores comparáveis a recordes globais (Lima *et al.*, 2024). Na barragem da usina hidrelétrica Dona

Figura 3. Panorama geral das cicatrizes de movimento de massa (em rosa), conforme dados disponíveis em Possanti *et al.* (2024).



Francisca, localizada no Rio Jacuí, a capacidade máxima de descarga do vertedor também foi superada, e o Plano de Ação Emergencial (PAE) teve que ser acionado. No Rio das Antas a capacidade máxima de descarga do vertedor foi superada na barragem Castro Alves, localizada entre os municípios de Nova Pádua e Nova Roma do Sul, e a barragem 14 de Julho, localizada mais a jusante, entre Cotiporã e Bento Gonçalves, sofreu um rompimento parcial. Esse rompimento parcial motivou o Governo Estadual a emitir um alerta para os moradores do Vale do Taquari (Rio Grande do Sul, 2024b), mas o efeito da ruptura parcial nos fluxos e níveis máximos a jusante foi relativamente pequeno, quando comparado à magnitude da enchente que já estava ocorrendo (Lima e Paiva, 2024; Collischonn *et al.*, 2025).

Em Muçum o Rio Taquari se elevou mais de 21 m ao longo de 62 horas, entre o dia 29 de abril e a manhã do dia 2 de maio, atingindo praticamente a mesma cota máxima ocorrida na cheia ocorrida em setembro de 2023.

Em Lajeado o Rio Taquari se elevou em quase 21 metros ao longo de 72 horas, entre os dias 29 de abril e 2 de maio, atingindo uma cota máxima mais de quatro metros acima das maiores enchentes até então vivenciadas na cidade (1941 e 2023), e constituindo a maior cheia em pelo menos 150 anos.

Os níveis da água muito mais altos do que durante as enchentes anteriores tiveram como consequência a inundação de áreas que nunca haviam sido atingidas. Além disso, a maior profundidade de água na planície, combinada com a conexão hidráulica entre diferentes partes da planície, fez com que a velocidade da água na área inundada fosse muito mais alta do que nas cheias anteriores. Finalmente, observou-se uma grande quantidade de troncos de árvores carregados pelos rios, o que foi, provavelmente, uma consequência dos extensos deslizamentos de terra, vários deles em áreas

íngremes com florestas nas margens dos rios, e da alta velocidade da água na planície de inundação, onde muitas árvores foram arrancadas e levadas pela correnteza. Todos esses fatores aumentaram expressivamente o poder destrutivo do escoamento de água nas áreas de inundação.

A cheia, de magnitude muito maior do que as anteriores, surpreendeu a população (Malinoski *et al.*, 2024). A inundação atingiu as residências de pessoas que não tinham experiência anterior com enchentes. Moradores mais experientes, que tentaram se abrigar nos andares superiores de suas casas, como costumavam fazer durante as enchentes menores a que estavam acostumados, acabaram sendo surpreendidos pela submersão ou destruição completa de suas casas. Estima-se que 9.300 residências tenham sido destruídas em todo o estado (CNM, 2024). Em apenas um bairro do município de Cruzeiro do Sul, na margem do Rio Taquari, 650 casas foram arrasadas.

Além do impacto nas residências e propriedades privadas, a cheia nos vales resultou na destruição parcial ou completa de dezenas de pontes e de longos trechos de estradas pavimentadas (BID, 2024).

5. A inundação extensa e duradoura na planície

Nos primeiros dias de maio de 2024 as cheias rápidas e intensas dos rios que drenam as partes mais montanhosas da bacia do Guaíba atingiram a região da Depressão Central, por onde escoam o Rio Jacuí. Nessa região de planície, o transbordamento inundou grandes extensões de várzeas, resultando em uma área inundada total que foi estimada em, aproximadamente, 15 mil km². A inundação das várzeas contribuiu para o maior atraso e amortecimento da cheia a jusante, reduzindo a amplitude da elevação do nível da água.

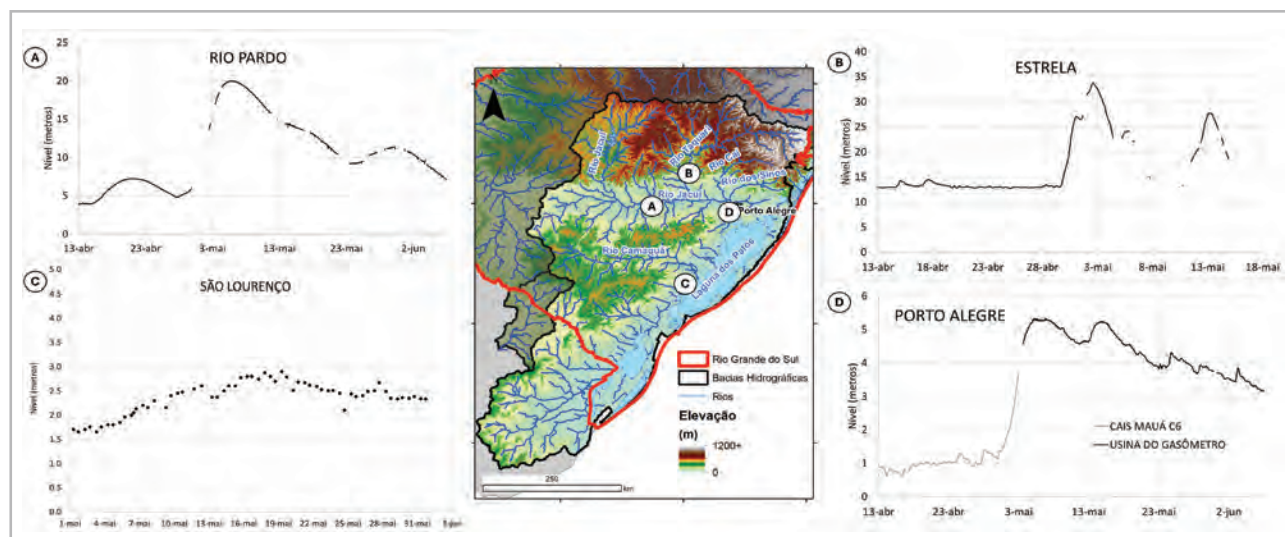


Figura 4. A região mais atingida pela cheia de abril e maio de 2024 e os cotagramas (gráficos de nível da água ao longo do tempo) nos Rios Jacuí (em Rio Pardo), Taquari (Lajeado), Guaíba (Porto Alegre) e na Laguna dos Patos (São Lourenço do Sul).

A Figura 4 mostra os cotagramas (gráficos de nível da água ao longo do tempo) nos Rios Jacuí (em Rio Pardo), Taquari (Lajeado), Guaíba e na Laguna dos Patos (São Lourenço do Sul). Observa-se que no Rio Taquari o nível da água subiu cerca de 20 metros, no Rio Jacuí aproximadamente 15 metros (em Rio Pardo), no Guaíba pouco mais de quatro metros, e na Laguna dos Patos, em São Lourenço do Sul, cerca de dois metros. O momento máximo da cheia ocorreu no dia 2 de maio em Lajeado, no dia 5 de maio em Rio Pardo e em Porto Alegre, e no dia 19 de maio em São Lourenço do Sul.

A forma do cotograma observado no Guaíba pode ser compreendida pela forma dos cotagramas dos dois principais rios. Por um lado, a cheia longa, mas com amplitude menor do Rio Jacuí, influenciado pelo efeito atenuador das extensas planícies inundáveis, e por outro a cheia rápida e de grande amplitude do Rio Taquari. O resultado foi uma cheia prolongada no Guaíba, mas com a subida mais rápida que já foi observada em qualquer cheia anterior, entre os dias 30 de abril e 5 de maio. Já na Laguna dos Patos, o cotograma mostra uma duração ainda mais longa, sendo

que o pior momento da cheia ocorreu duas semanas após o pico da cheia em Porto Alegre. Os cotagramas também mostram que os picos das cheias dos Rios Taquari e Jacuí não chegaram no mesmo dia no Guaíba. Caso esse sincronismo dos picos tivesse ocorrido, a cheia na Região Metropolitana de Porto Alegre poderia ter sido ainda mais grave do que foi.

O nível da água máximo no Guaíba, medido em relação ao nível de referência histórico da estação "Praça da Harmonia", foi de 5,37 metros. A comparação de marcas da cheia de 2024 e marcas históricas da cheia de 1941 no Centro Histórico revelou que a cheia de maio de 2024 superou em 41 a 43 cm a cheia de 1941 (Marcuzzo *et al.*, 2024; Germano *et al.*, 2024). O valor máximo do nível da água ocorreu na manhã do dia 5 de maio. No final da tarde do mesmo dia, medições realizadas no Guaíba, na seção transversal entre a Ponta da Cadeia e a Ilha da Pintada, indicaram a vazão (volume de água que passa em um trecho do rio em um certo intervalo de tempo) de $30.180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Andrade *et al.*, 2024). É muito provável que a

vazão máxima do Rio Guaíba tenha sido ainda maior do que esse valor medido, em função de áreas não acessadas pelo método empregado.

No período em que o Guaíba atingiu os níveis mais altos o vento foi relativamente fraco e teve pouca influência sobre a cheia. Entretanto, no final de maio, quando ocorreram alguns períodos de ventos mais intensos, com direção alinhada com a Laguna dos Patos, os efeitos do vento tornaram-se mais evidentes no nível do Guaíba, em Porto Alegre. Naquele momento, todavia, o nível já havia diminuído para cerca de quatro metros.

A cheia de 2024 em Porto Alegre também foi impactante pela sua longa duração. Após o primeiro pico, que ocorreu em 5 de maio, o nível do Guaíba diminuiu cerca de 80 cm. Entretanto, após novas chuvas sobre a bacia hidrográfica, entre os dias 10 e 12 de maio, um segundo o pico de cheia ocorreu em Porto Alegre entre os dias 14 e 15 de maio, com nível máximo apenas alguns centímetros abaixo do pico ocorrido em 5 de maio. A duração total da cheia acima dos níveis de inundação em Porto Alegre foi de cerca de 30 dias.

6. Falhas nos sistemas de proteção contra cheias amplificaram os impactos negativos

Um extenso sistema de defesa contra cheias, composto por diques, muros e estações de bombeamento, foi projetado e construído após a histórica cheia de 1941, para proteger Porto Alegre e outras cidades da região metropolitana. Na região central de Porto Alegre, o sistema de proteção foi projetado com uma elevação de cota de seis metros, três metros acima do nível de piso de referência do principal porto da cidade, o Cais Mauá. Essa referência de projeto foi obtida adicionando-se à elevação máxima da cheia de 1941 observada na estação de medição

do porto de Porto Alegre, que foi estimada em 4,75 metros, mais uma margem de segurança de 1,25 metro (Rauber, 1992). O sistema na data de ocorrência da cheia de 2024 era composto por cerca de 68 quilômetros de diques internos e externos, 14 comportas metálicas e 23 casas de bombas espalhadas pela capital. Da extensão total dos diques, cerca de 2,7 km são compostos por um muro de concreto junto à Avenida Mauá, em Porto Alegre, conhecido como “muro da Mauá”. Os portões metálicos, ou comportas, são posicionadas principalmente na face leste do sistema, frente ao Guaíba, com objetivo de serem fechadas e bloquear a entrada de suas águas em caso de cheia. Em épocas sem cheia as aberturas das comportas nos diques de defesa contra cheias servem de locais de acesso de veículos e pessoas ao lado externo do sistema de proteção, como ao porto e aos cais.

A cota de projeto de seis metros no Cais Mauá durante a enchente de maio de 2024 não foi superada pelo nível da água do Guaíba, no entanto, os sistemas de proteção tiveram falhas generalizadas, resultando na inundação de muitos bairros.

As falhas generalizadas do sistema de defesa contra inundações aconteceram devido a uma variedade de fatores, em praticamente todas as regiões que supostamente eram protegidas e em quase todos os tipos de estruturas protetoras: diques, comportas e casas de bombas.

Em alguns locais a entrada de água ocorreu através de comportas metálicas. Uma dessas comportas (número 14), mais ao norte de todas, tombou, contribuindo para a inundação da parte norte de Porto Alegre, incluindo a região do aeroporto. Várias outras comportas, em outros pontos da cidade, apresentaram brechas e falhas de vedação, permitindo que a água do rio vazasse para a área protegida da cidade. Notadamente os vazamentos das comportas junto à Avenida

Mauá foram amplamente percebidos e noticiados (Malinoski *et al.*, 2024), por terem ocorrido no Centro da cidade.

Na região do Centro Histórico de Porto Alegre, houve refluxo do Guaíba para o interior da parte protegida da cidade através das galerias das estações de bombeamento, que servem para drenar o escoamento da chuva local da cidade para o rio. Essa situação foi amplamente visualizada no Centro da cidade, na Estação de Bombeamento de Águas Pluviais (Ebap) número 17, em frente à Igreja das Dores, em Porto Alegre (Malinoski *et al.*, 2024). A situação se agravou quando foi necessário interromper o fornecimento de energia elétrica em várias partes da cidade de Porto Alegre, por questões de segurança. Em consequência disso, várias estações de bombeamento foram desligadas por falta de energia. Notadamente o desligamento com pouco aviso prévio da Ebap número 16,

na proximidade da Rótula das Cuías, em Porto Alegre, causou uma série de transtornos, com pouco tempo para reação dos residentes em ruas dos bairros Menino Deus, Praia de Belas e Cidade Baixa (Malinoski *et al.*, 2024).

Em outros locais as falhas do sistema de proteção ocorreram porque a construção dos diques não foi concluída de acordo com as especificações do projeto ou porque o dique havia sido rebaixado depois de concluído. A entrada de água para as áreas supostamente protegidas também ocorreu em alguns pontos onde uma seção do dique estava total ou parcialmente ausente e onde não havia comporta, como na intersecção de algumas rodovias com o dique. O caso de dique incompleto e de dique com aberturas para passagem de vias sem comportas foi observado no norte da cidade de Porto Alegre, em locais que supostamente protegeriam a zona norte da cidade (Collischonn *et al.*, 2025). Já o exemplo de



Centro de Porto Alegre durante a inundação.

caso de dique rebaixado foi observado na cidade de Canoas (Collischonn *et al.*, 2025).

Pelos dados disponíveis, em princípio os únicos locais onde houve superação de níveis de projeto do sistema de diques foi em áreas localizadas às margens do Rio dos Sinos, em São Leopoldo e Novo Hamburgo. A descrição mais detalhada das falhas no sistema de proteção pode ser encontrada em Collischonn *et al.*, (2025).

Com as falhas do sistema de proteção, bairros inteiros foram inundados pela água que, em questão de poucas horas, atingiu mais de dois metros de profundidade sobre as ruas em alguns locais. Muitas dessas falhas ocorreram durante a noite, o que contribuiu para os grandes prejuízos e o expressivo número de vítimas fatais. Cruzando os dados de manchas de inundação e áreas protegidas disponibilizados em Possanti *et al.* (2024) e Collischonn *et al.* (2025) com o Censo Demográfico (IBGE, 2022), estima-se que cerca de 35% a 40% da população do Rio Grande do Sul diretamente atingida pelo evento de inundação de 2024 se encontrava em áreas cobertas pelos sistemas de proteção contra cheias que falharam.

7. Previsão e alerta de cheias podem reduzir impactos negativos

Uma das estratégias mais adequadas para diminuir os prejuízos econômicos e as fatalidades durante as cheias é a comunicação clara e antecipada sobre as áreas que serão inundadas, e sobre os níveis máximos que a água poderá atingir. Para isto é necessário um sistema de previsão e alerta de cheias. No Rio Grande do Sul existem diversas iniciativas nesse sentido, de órgãos estaduais, como a Secretaria de Meio Ambiente (Sema), e de órgãos federais, como o Serviço Geológico do Brasil (SGB) e o

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden).

Para o Rio Grande do Sul os alertas emitidos pelo Cemaden não incluíam informações detalhadas sobre os níveis dos rios, ou sobre áreas inundadas. Antes da ocorrência das cheias principais o Cemaden emitiu alertas de risco hidrológico para a metade sul do estado. O alerta foi classificado no nível laranja (alto), em uma escala que vai até o vermelho (muito alto).

Em escala regional, o estado do Rio Grande do Sul também emitiu boletins de previsão e alerta por meio da Sala de Situação do governo, que opera um modelo hidrológico em escala estadual, subsidiando a Defesa Civil estadual (Nectoux *et al.*, 2019; Fan *et al.*, 2019). No entanto, esse sistema também não previa previsões detalhadas dos níveis dos rios, nem de áreas inundadas. No principal boletim diário, emitido em 29 de abril, a Sala de Situação da Sema indicou risco no nível laranja (alerta) para chuvas extremas e elevação das condições dos rios.

O SGB opera um sistema chamado Sace (Sistema de Alerta de Cheias), que gera previsões para os Rios Taquari, Caí e Uruguai. Esse sistema permite prever o nível da água dos rios com quatro a dez horas de antecedência, dependendo do local. Em ambas as bacias, os alertas antecipados do Sace em 30 de abril previram eventos acima dos níveis máximos de alerta (vermelho). No entanto, após o início do evento, a força das águas destruiu parte das estações de monitoramento, comprometendo a utilização dos modelos após o início das cheias.

Os alertas da Defesa Civil em 29 de abril, também emitidos pelo Governo Estadual, apontaram risco de inundação em cidades pontuais da bacia do Rio Jacuí. Em 30 de abril, os alertas começaram a incluir a ocorrência de inundações ao longo dos principais Rios, Taquari e Jacuí. Esses

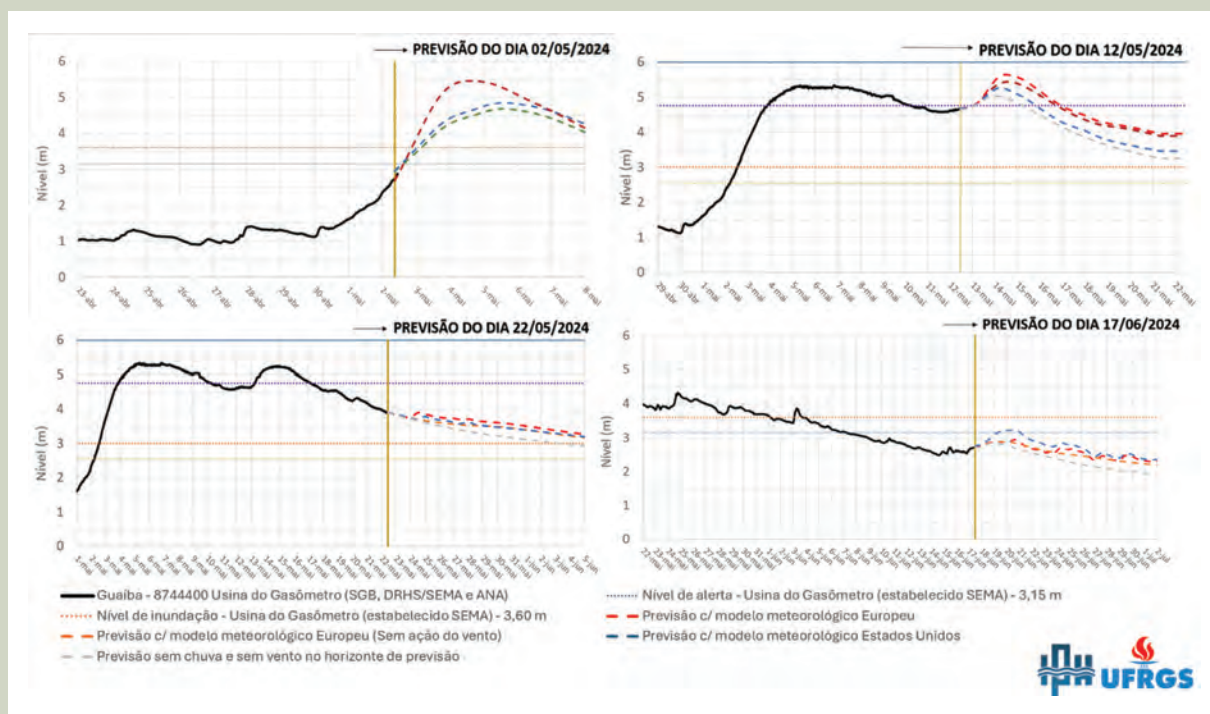


Figura 5. Exemplo de previsões emitidas pela equipe do IPH/UFRGS durante a cheia de 2024.

alertas consistiam em áreas de risco estimadas manualmente e informações textuais. A população registrada em um serviço de telefonia móvel dentro das áreas de risco delimitadas recebeu mensagens SMS sobre a existência de perigo.

Nenhuma das instituições oficiais forneceu previsões detalhadas de nível para o Rio Guaíba, o que gerou grande preocupação sobre o que poderia acontecer em Porto Alegre e cidades próximas, como Eldorado do Sul, Guaíba, Canoas e outras, já que níveis sem precedentes estavam sendo observados a montante. Diante dessa preocupação, de forma voluntária, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) começou a emitir previsões baseadas em uma cadeia de modelos matemáticos que simulam a hidrologia das bacias e hidrodinâmica dos rios, fundamentada em desenvolvimentos de

pesquisas científicas anteriores. As previsões começaram a ser elaboradas no dia 1º de maio e foram disponibilizadas ao público em geral por meio de redes sociais a partir de 2 de maio.

As previsões do IPH/UFRGS consistiram em gráficos mostrando a evolução prevista dos níveis do Guaíba e boletins com principais interpretações e recomendações. Um conjunto de quatro possíveis cenários futuros era avaliado a cada nova previsão, utilizando combinações de condições de chuva e intensidade e direção do vento. As previsões quantitativas de chuva e vento foram obtidas dos modelos meteorológicos globais do Centro Europeu de Previsão de Médio Prazo (modelo ECMWF) e da Agência Atmosférica e Oceânica dos Estados Unidos (modelo GFS). Para gerar os quatro cenários, as previsões meteorológicas foram combinadas ainda com situações hipotéticas sem chuva e sem vento

(nível base). A Figura 5 apresenta exemplos de previsões emitidas em datas-chave ao longo do evento de cheia. A previsão de 2 de maio mostra que o pico da cheia acima de 5 m foi previsto com três dias de antecedência. Além dos gráficos, as previsões eram emitidas com boletins textuais explicativos do que significam os resultados. As previsões de 12 de maio mostraram que o segundo pico da cheia foi bem estimado quase sete dias antes de sua ocorrência. Já a previsão de 22 de maio e a previsão do dia 17 de junho capturou com precisão a duração de quase um mês da cheia e o término do evento.

Junto com as previsões emitidas pelo IPH/UFRGS para o Guaíba também foram disponibilizados mapas de inundação de toda a região de Porto Alegre, o que facilitou a interpretação da população do significado dos valores dos níveis previstos em termos de impacto (Possanti *et al.*, 2024). O consistente desempenho das previsões emitidas pelo IPH/UFRGS em conjunto com o mapeamento das áreas afetadas pode servir de modelo para futuras iniciativas operacionais no estado.

Iniciativa similar ao que foi realizado pelo IPH/UFRGS foi conduzida por equipes de pesquisadores da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) para os Rios Piratini, Jaguarão e Camaquã, e no extremo sul da Laguna dos Patos por equipes da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Reforçando o papel da ciência para o enfrentamento da crise.

8. Conclusões

O Rio Grande do Sul, bem como toda a região Sul do Brasil, é uma região naturalmente suscetível à ocorrência de grandes enchentes, concentrando os rios em que ocorrem as maiores variações de nível da água em 24 horas em todo o Brasil, com vazões máximas que se aproximam dos recordes mundiais.

Em abril e maio de 2024 a Bacia Hidrográfica do Guaíba, no Rio Grande do Sul, passou pela maior enchente da sua história conhecida, com os mais altos níveis da água observados em, pelo menos, 150 anos.

A enchente de 2024 foi causada pela maior chuva observada no Brasil ao longo dos últimos 64 anos, pelo menos. Ao longo dos vales dos Rios Caí, Taquari, Pardo e outros, as chuvas saturaram o solo e provocaram movimentos de massa e rápidas elevações do nível da água que superaram, em muito, as cheias conhecidas até então. Em consequência do nível da água mais alto do que em outras cheias conhecidas, uma área maior foi inundada, atingindo residentes que se consideravam a salvo desse tipo de situação. Além disso, a maior profundidade da água nas áreas inundadas resultou em uma maior velocidade da água, aumentando o poder destrutivo da cheia.

Devido ao amortecimento exercido pelas planícies de inundação, que ocorre à medida que os rios começam a percorrer a Depressão Central, a cheia teve uma elevação dos níveis de água relativamente menor e uma duração maior na região mais densamente habitada do estado: a Região Metropolitana de Porto Alegre. Mesmo assim, a cheia de 2024, que atingiu o seu pico em Porto Alegre no dia 5 de maio, superou todas as cheias do histórico de observação, que se inicia ainda no século XIX, excedendo em quase meio metro o nível máximo da cheia de 1941.

Na Região Metropolitana de Porto Alegre os impactos da cheia poderiam ter sido amplamente minimizados, caso o sistema de defesa contra inundações estivesse operando de acordo com a cheia hipotética para a qual foi projetado. As falhas que ocorreram no sistema de defesa contra inundações demonstraram que a proteção eficaz contra inundações não pode ficar limitada à construção da infraestrutura física, pois

também requer sistemas de gestão institucional que garantam que as defesas contra inundações permaneçam funcionais e capazes de operar sob as condições para as quais foram projetadas.

As previsões da cheia realizadas operacionalmente pelo SGB nos Rios Caí e Taquari e, de forma extraordinária, pelo IPH/UFRGS no Guaíba, demonstraram que a previsão dos níveis máximos da água e das áreas potencialmente inundadas, com algumas horas ou dias de antecipação, é uma das estratégias mais adequadas e factíveis para diminuir os prejuízos econômicos e as fatalidades durante as cheias.

Referências

- ANDRADE, M. M. *et al.* Flow measurements with ADCP on the Guaíba River, during the highest water level recorded in history-May 2024 (Floods in the state of Rio Grande do Sul, Brazil). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* – RBRH, 29, e36, 2024.
- ANDRADES FILHO *et al.* Nota técnica conjunta Igeo/CEPSRM. Mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa decorrentes do acumulado de chuva no RS entre 27/04 e 13/05 de 2024. 2024. Available at: <https://doi.org/10.13140/rq.2.2.10472.89609>.
- BID. *Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul*. Relatório do Banco Interamericano de Desenvolvimento. Novembro de 2024.
- CEMADEN. *Mapeamento dos movimentos de massa relacionados ao desastre de abril-maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul*. Nota técnica nº 412/2024/SEI-Cemaden, 2024.
- CNM. *CNM atualiza prejuízos dos municípios com as chuvas no RS: impacto é de R\$ 12,8 bilhões*. 2024. Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/cnm-atualiza-prejuizos-dos-municipios-com-as-chuvas-no-rs-impacto-e-de-r-12-8-bilhoes>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- COLLISCHONN, W. *et al.* *Análise da antecedência mínima necessária para previsões de inundações em Lajeado, no Rio Taquari (RS)*. II Encontro Nacional de Desastres (IIEND). Rio de Janeiro. Anais do II Encontro Nacional de Desastres (IIEND). Porto Alegre: ABRHidro, 2020.
- COLLISCHONN, W. *et al.* Precipitation that led to the floods in South Brazil set a new record. *RBRH*, 2024. Available at Scielo Preprints: <https://doi.org/10.1590/scieloPreprints.9773>
- COLLISCHONN, W. *et al.* The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in Southern Brazil. *RBRH*, v. 1, 2025.
- COLLISCHONN, W. *et al.* *Nota técnica – Chuva da cheia de 2024 foi mais volumosa e intensa que a da cheia de 1941 na Bacia Hidrográfica do Guaíba*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Serviço Geológico do Brasil, 2024.
- FAN, F. M. *et al.* Development of a flood forecasting system for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. EGU General Assembly 2019. Viena, Áustria. *Geophysical Research Abstracts*. Viena: EGU, v. 21, 2019, p. 10547-10547.
- FRANCK, A. G. *et al.* *Avaliação emergencial do perigo de ocorrência de movimentos de massa: exemplo do desastre de 2024 na região dos vales no RS*. Anais do IV Encontro Nacional de Desastres ABRHidro. Curitiba, 2024.
- GERMANO, A. D. O. *et al.* Nota técnica: Avaliação indireta do nível máximo do Guaíba na região central de Porto Alegre entre as Estações Cais Mauá C6 e Usina do Gasômetro. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2024.
- GUIMARAENS, R. *A enchente de 1941*. Porto Alegre: Libretos, 2025.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo demográfico do Brasil de 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>.
- KOBIYAMA, M. *et al.* Sugestões às comunidades locais sobre a gestão de risco de desastres com base nas experiências *insitu* durante a tragédia de 2024 no Rio Grande do Sul.
- MAGNONI JR., I. *et al.* (Orgs.). *Do local ao global – mudanças climáticas e gestão de risco de desastres*, 2024, p.11-38. (in press).
- KUNKEL, K. E.; CHAMPION, S. M. An assessment of rainfall from hurricanes Harvey and Florence relative to other extremely wet storms in the United States. *Geophysical Research Letters*, 46 (22), 2029, p. 13500-13506.
- LIMA, S.; KUCHINSKI, V.; PAIVA, R. C. D. Vazões excepcionais das grandes cheias de 1941, 2023 e 2024 no Rio Grande do Sul. Anais do IV Encontro Nacional de Desastres ABRHidro. Curitiba, 2024.
- LIMA, S.; PAIVA, R. C. D. *Análise dos impactos em cenários de rompimento hipotéticos da UHE 14 de Julho no Rio Taquari-Antas*. Porto Alegre: UFRGS-IPH, 2024. (Nota técnica). Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-analise-dos-impactos-em-cenarios-de-rompimento-hipoteticos-da-uhe-14-de-julho-no-rio-taquari-antas/>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- LOPES, Vitória Ache Rocha *et al.* A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. *Journal of Hydrology*, v. 565, 2018, p. 177-196. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.011>
- MALINOSKI, André; GONZATTO, Marcelo; LOPES, Rodrigo. *A enchente de 24: a história da maior tragédia climática de Porto Alegre*. 1 ed. Porto Alegre: BesouroBox, 2024.
- MARCUZZO, F. F. N. *et al.* *Nota técnica: Aferição direta e avaliação indireta do nível máximo de rios em estações fluviométricas e marcas de inundação no Rio Grande do Sul na grande cheia de maio de 2024*. 6 vers. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2024. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24939.10>. Acesso em: 31 out. 2024.
- MARENGO, J. A. *et al.* O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, 38(112), 2024, p. 203-228.
- MIRANDA, P. T. *et al.* *Rios da região Sul possuem as cheias mais abruptas do Brasil*. Anais do IV Encontro Nacional de Desastres ABRHidro. Curitiba, 2024.
- NECTOUX, M. *et al.* *Previsão de cheias e produção de avisos no estado do Rio Grande do Sul através da sala de situação Sema/RS e modelo MGB*. Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRHidro, v. 1, 2019, p. 1.
- PAIVA, R. C. D. *et al.* *Cooperação em tecnologias para análises*

hidrológicas em escala nacional. Clima: sensibilidade de vazões a variabilidade e mudanças climáticas – Relatório final. IPH-ANA-HGE-Clima-A2. Porto Alegre: IPH-UFRGS; Brasília: ANA, 2024.

- POSSA, T. M. et al. Hydrological-hydrodynamic simulation and analysis of the possible influence of the wind in the extraordinary flood of 1941 in Porto Alegre. *RBRH*, v. 27, 2022, p. 1-23. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.272220220028>
- POSSANTTI, I. et al. *Banco de dados das cheias na região hidrográfica do Lago Guaíba em maio de 2024*. 2024. Disponível em: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.11164049>
- POSSANTTI, I.; MÜLLER, J.; RUHOFF, A. (Eds.). *Cheias no Rio Grande do Sul – base de dados e informações geográficas na região hidrográfica do Lago Guaíba e na Lagoa dos Patos em 2024*. UFRGS, 2024. Disponível em: <https://storymaps.arcgis.com/stories/a81d69f4bccf42989609e3fe64d8ef48>
- RAUBER, V. *Prevenir é o melhor remédio*. Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 1992.
- REBOITA, M. S. et al. A multi-scale analysis of the extreme precipitation in Southern Brazil in April/May 2024. *Atmosphere*, 15(9), 2024, p. 1123.
- RIO GRANDE DO SUL. *Mapa único do Plano Rio Grande*. Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://mup.rs.gov.br/>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- RIO GRANDE DO SUL. *Defesa Civil alerta para rompimento parcial da barragem 14 de Julho em Cotiporã*. 2024. Disponível em: <https://www.defesacivil.rs.gov.br/defesa-civil-alerta-para-rompimento-parcial-da-barragem-14-de-julho-em-cotipora>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- SILVEIRA, A. L. L. et al. A histórica da cheia de 1941 na Bacia Hidrográfica do Guaíba. ZANANDREA, F. et al. *Desastres e água: eventos históricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.
- TORRES, L. H. Águas de maio: a enchente de 1941 em Rio Grande. *Historiae*, 3(3), 2012, p. 239-254.
- ZANANDREA, F. et al. (Orgs.). *Desastres e água: eventos históricos no Brasil*. 1. ed. Porto Alegre: ABRHidro, v. 1, 2023.

Equipe de trabalho

- Fernando Mainardi Fan
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Anderson Ruhoff
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Walter Collischonn
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Pedro Torres Miranda
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Doutorando no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

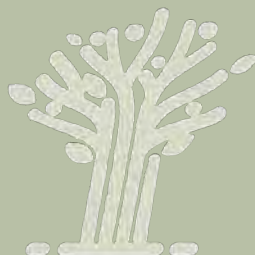




Avaliação dos impactos das enchentes de maio de 2024 em variáveis econômicas e sociais dos municípios do RS afetados pela mancha de inundação¹

GIBRAN DA SILVA TEIXEIRA
PEDRO HENRIQUE SOARES LEIVAS
VINICIUS HALMENSCHLAGER
MÁRCIO NORA BARBOSA
TATIANA SILVA DA SILVA
ALISSON FIORENTIN
JOSÉ NUNES DE AQUINO





RESUMO

Em maio de 2024, no Rio Grande do Sul, uma precipitação recorde de 652 mm resultou em 180 mortes, mais de 500.000 desabrigados e severos danos às cidades à margem de rios e lagoas. O presente artigo visa avaliar os impactos socioeconômicos das enchentes nos municípios do Rio Grande do Sul, utilizando metodologia econométrica de regressões de Diferenças em Diferenças (Diff-in-Diff). Esse método é aplicado para dimensionar os efeitos das enchentes recentes sobre variáveis socioeconômicas (emprego, arrecadação e saúde), contribuindo assim para a compreensão e proposição de instrumentos de adaptação aos fenômenos promovidos pelas mudanças climáticas. Os principais resultados indicam que esses efeitos são consideráveis no mercado de trabalho, arrecadação fiscal, incidência de doença infecciosa e capacidade de atendimento da atenção básica em saúde. Ademais, as evidências sugerem que os efeitos econômicos e sociais se tornam mais acentuados à medida que os municípios enfrentam maiores níveis de exposição ao desastre.



Ricardo Stuckert/Secom-PR

Zona Norte de Porto Alegre com o Aeroporto Salgado Filho à frente.

1. Introdução

Os eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes e intensos, provocando impactos devastadores nas economias locais, bem como nos aspectos sociais e ambientais das regiões afetadas. As enchentes de 2024 evidenciaram a vulnerabilidade das cidades gaúchas, especialmente aquelas situadas em regiões costeiras e áreas ribeirinhas, que sofreram com o aumento abrupto dos níveis de rios e lagoas. De acordo com Fonseca *et al.* (2024), a partir dos resultados gerados por imagens de satélites, 5% da área urbanizada do Rio Grande do Sul foi atingida.

Além da destruição de estradas, pontes e edificações, o impacto ambiental também foi substantivo, com degradação de ecossistemas locais, acarretando perdas na cobertura e no uso da terra². De acordo com o Mapa Único Plano Rio Grande – MUP/RS³, o episódio de maio de 2024 foi o maior em 125 anos de registros, gerado por uma precipitação excepcional de 652 mm, aproximadamente seis vezes o volume habitual para o período, atingindo bacias hidrográficas na região norte, central, metropolitana e sul do estado. Esse evento trágico provocou a morte de 180 pessoas, deixou mais de 500 mil desabrigados, causou destruição em

larga escala de propriedades e gerou severos danos à infraestrutura pública e privada (MUP-RS, 2024).

Em virtude dos danos estruturais e ambientais destacados, torna-se relevante também mensurar os efeitos das enchentes sobre dimensões econômicas e sociais dos municípios gaúchos afetados, já que as enchentes acarretaram paralização de atividade econômica, o contato da população com águas contaminadas e, pelo comprometimento de instalações de saúde, impediram o acesso de muitas localidades ao sistema de saúde. Diante desse contexto, o presente estudo tem por objetivo contribuir com a geração de informação qualificada, ao mensurar os impactos das enchentes de maio de 2024 sobre variáveis como emprego formal, arrecadação do Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS, incidência de doenças infecciosas e um grupo de variáveis ligadas ao acesso à atenção básica de saúde pública nos municípios diretamente afetados pelas enchentes no estado do Rio Grande do Sul.

Esse conjunto de variáveis foi selecionado em virtude de sintetizar uma gama de dimensões que geram impacto direto no bem-estar da população afetada. As dimensões de emprego e de arrecadação refletem a dinâmica da atividade econômica dos municípios. As variáveis de saúde, em especial as de acesso à atenção primária em saúde, foram usadas para identificar as restrições de acesso aos serviços de saúde impostos pelas enchentes. Para tanto, será aplicado o método econométrico de Diferenças em Diferenças (Diff-in-Diff) com distintas especificações, tomando por base cinco composições de municípios tratados, de acordo com a proporção da população afetada (T10: $\geq 10\%$, T20: $\geq 20\%$, T30: $\geq 30\%$, T40: $\geq 40\%$ e T50: $\geq 50\%$), totalizando 72, 42, 27, 13

e seis municípios tratados, respectivamente. Já o grupo controle, estável para todas as estimativas, conteve 310 municípios, incluindo aqueles com até 1% da população atingida diretamente, conforme dados disponíveis na plataforma MUP-RS (2024).

Além desta introdução, o trabalho está estruturado em mais quatro seções principais. A primeira apresenta uma revisão de literatura, abordando estudos nacionais e internacionais que analisam os efeitos de desastres naturais sobre aspectos sociais e econômicos. Em seguida, a metodologia é discutida, com detalhamento do modelo econométrico utilizado e dos dados coletados. A terceira seção expõe os resultados obtidos e sua análise, enquanto a última seção traz as considerações finais e as implicações do estudo.

2. Fundamentação teórica

No cerne das discussões sobre as mudanças climáticas está a questão dos desastres naturais, fenômenos da natureza que, associados às ações do homem, podem provocar danos que perpassam dimensões sociais, humanas e econômicas (World Bank; United Nations, 2010). A grande quantidade de catástrofes naturais ao redor do mundo com estragos e prejuízos acentuados, frequentemente noticiadas pela mídia, aumentaram o interesse da literatura sobre os impactos desses eventos.

Existem evidências de que, ao longo das últimas décadas, as catástrofes têm aumentado em grau de ocorrência e têm se tornado mais graves, ocasionando custos econômicos e sociais não desprezíveis (Noy; Vu, 2010; Pachauri *et al.*, 2014). Não obstante, em termos teóricos, a medida ideal dos prejuízos econômicos de um desastre natural seria dada pela perda de bem-estar decorrente do evento (Kouski, 2014).

Com intuito de estimar essa perda, usualmente, a teoria econômica divide os custos em dois grupos, os custos diretos e indiretos (Hallegatte, 2014; Kouski, 2014).

As perdas diretas estão associadas aos resultados imediatos da catástrofe, como a destruição física, e são divididas entre as relacionadas e as não relacionadas ao mercado. As mercadológicas são aquelas que podem facilmente ser precificadas, como a destruição de infraestrutura, casas, prédios, pontes, produção, capital produtivo e os recursos para recuperação das áreas afetadas. Já os prejuízos diretos não mercadológicos são aqueles que não podem ser reparados ou adquiridos em um mercado, ou seja, aqueles bens em que é difícil atribuir um preço a partir de montantes financeiros. Nesse grupo estão inseridos os



Área urbana da capital do RS tomada pelas águas.

danos imediatos à saúde, como as lesões, ferimentos e outras morbidades, além das perdas de vida, danificação de patrimônios históricos e culturais com valor intangível, e os prejuízos ao ambiente natural e aos ecossistemas.

Por outro lado, os custos indiretos englobam as perdas que não são motivadas pelo desastre em si, mas sim por suas consequências. De tal modo, esses tendem a se manifestar por períodos mais longos que a incidência do evento e são menos tangíveis (Hochrainer, 2009). A magnitude dos efeitos indiretos e seu alcance está intrinsecamente relacionada à capacidade da região de lidar com os custos diretos dos fenômenos. Isso ocorre uma vez que os danos indiretos continuam a se manifestar, enquanto o processo de reconstrução não é finalizado e, portanto, a capacidade produtiva não é retomada (Hochrainer, 2009). Em um ambiente institucional favorável e com um sistema econômico eficiente, em que os danos diretos sejam rapidamente recuperados – com facilidade de acesso a crédito, por exemplo – as perdas de bem-estar relacionadas aos custos indiretos dos desastres naturais tendem a ser minimizadas (Hallegatte, 2014).

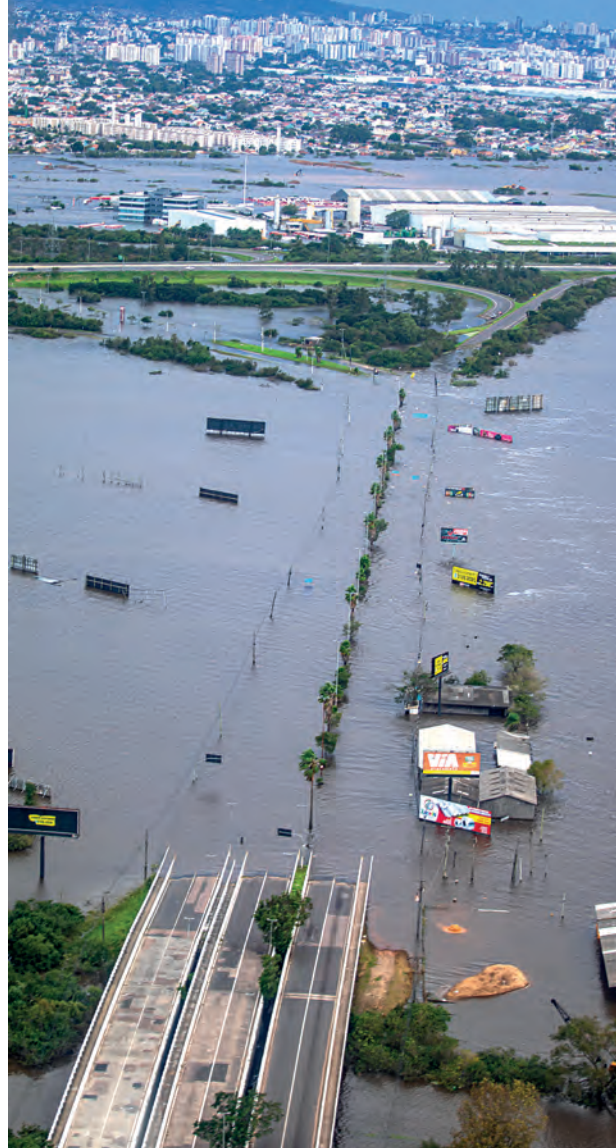
No entanto, devido à imprevisibilidade de ocorrência dos desastres e das incertezas relativas ao comportamento dos indivíduos perante os riscos e medidas preventivas (Benôit; Dubra, 2013), muitas regiões não estão preparadas para atenuar ou controlar os impactos socioeconômicos diretos e indiretos. Ademais, as catástrofes ocorrem em diferentes intensidades, podendo provocar pequenos danos ou grandes destruições conforme a estrutura da região atingida. Dessa forma, estudos indicam que, em países e localidades em desenvolvimento, os desastres naturais causam danos mais incisivos (Toya e Skidmore, 2007; World Bank; United Nations, 2010). Ainda,

de modo geral, indivíduos em piores condições socioeconômicas são mais sensíveis aos danos provocados pelos desastres, uma vez que tendem a habitar regiões mais propensas a eles, além de não apresentarem condições econômicas suficientes para se recuperar dos prejuízos causados.

Em virtude da recente ocorrência da enchente que atingiu o Rio Grande do Sul e da tempestividade da análise, este trabalho se concentra no estudo dos efeitos sobretudo diretos sobre a sociedade gaúcha. Conforme indicado pela literatura, os efeitos de curto prazo perpassam especialmente duas dimensões relevantes, os impactos sobre a esfera econômica (Skidmore; Toya, 2002; Toya; Skidmore, 2007) e as questões sociais, associadas aos efeitos na saúde (Alderman; Turner; Tong, 2012; Carmo; Anazawa, 2014; Who; Wmo, 2012). Tais pontos são poucos explorados para os desastres ocorridos no Brasil, principalmente quando analisados os efeitos em nível regional.

Em termos dos efeitos econômicos de curto prazo, janela de análise deste trabalho, parte majoritária da literatura, como indicado por Chhibber e Laajaj (2008) e Hsiang e Jina (2014), consentem que a destruição do capital físico e danos sobre o capital humano ressaltam os impactos negativos dos desastres. Assim, as catástrofes naturais geram efeitos negativos sobre a atividade econômica, implicando redução, por exemplo, do Produto Interno Bruto das regiões atingidas (Bergholt; Lujala, 2012; Hochrainer, 2009; Strobl, 2010).

Conforme Klomp e Valckx (2014), os efeitos negativos sobre a economia são motivados por diversos fatores. Os autores ressaltam a interrupção da atividade produtiva pela ocorrência do evento; a redução de transações econômicas; a redução imediata de



Lucas Leffa/Secom-PR

Alagamento encobre as pistas da estrada na entrada de Porto Alegre.

investimentos; a destruição da infraestrutura pública; a depreciação do capital das empresas, com destruição de maquinários e unidades produtivas; perda de postos de emprego; redução da arrecadação fiscal; gastos não previstos; perdas na atividade agrícola, redução do comércio e dos serviços, entre outros (Berlemann; Wenzel, 2018; Klomp; Valckx, 2014).

Em específico para o Brasil, poucos são os artigos que buscam analisar o impacto econômico dos desastres naturais no país. Cabe ressaltar o trabalho de Ribeiro *et al.* (2014), que procura mensurar o impacto econômico das chuvas ocorridas em 2008 em Santa Catarina.

Os autores encontram indícios de que a produção industrial do estado seria 5,13% maior, caso não tivessem ocorrido as chuvas. Para o mesmo evento, Lima e Barbosa (2018) indicaram que os municípios diretamente afetados pelo desastre tiveram uma queda de 7,6% no PIB *per capita*. Outra pesquisa é de Haddad e Teixeira (2015), que busca avaliar o impacto dos alagamentos em São Paulo. Os resultados apontam para a redução do crescimento econômico da cidade e do bem-estar da população, além da redução da competitividade com relação ao mercado interno e externo.

Além dos efeitos econômicos, os desastres naturais têm impactos significativos em dimensões sociais, particularmente na saúde pública. Alderman, Turner e Tong (2012) destacam que esses efeitos são especialmente severos em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde a frequência dos desastres é maior e a população é mais vulnerável a seus reflexos. Outros estudos corroboram essa perspectiva (Berlemann; Wenzel, 2018; Kousky, 2014), apontando que fatores como educação, urbanização e qualidade institucional são determinantes para a vulnerabilidade aos impactos adversos de desastres, além da renda.

Os efeitos sobre a saúde vão além das fatalidades diretas, como afogamentos, hipotermias e ferimentos, e incluem o aumento de doenças causadas por danos ao meio ambiente e à infraestrutura. Entre os fatores de transmissão estão a contaminação de água e alimentos, o comprometimento do saneamento básico, a contaminação do solo e alterações nos ciclos de vetores e reservatórios de doenças. Esses impactos também são agravados pela deterioração das condições socioeconômicas, incluindo choques de renda, perdas de ativos e a precarização dos cuidados com a saúde (Du *et al.*, 2010; Wood; Bourque, 2018).

Entre as doenças relacionadas a desastres naturais, merece destaque a leptospirose, frequentemente associada a eventos hidrológicos. De acordo com a World Health Organization (2005b), essa doença zoonótica bacteriana é a única propensa a surtos epidêmicos como resultado direto de eventos extremos. A transmissão está vinculada tanto à água quanto a vetores associados, tornando-se um problema de saúde pública crítico em situações de desastres naturais, especialmente em áreas com infraestrutura inadequada.

3. Metodologia e estratégia de ação

A estratégia metodológica adotada no presente trabalho busca mensurar de forma segmentada em grupos de municípios os impactos do evento climático extremo ocorrido no Rio Grande do Sul sobre os indicadores propostos. A análise será realizada por meio de metodologia econométrica para avaliação de impacto, e se propõe a identificar os efeitos microeconômicos do evento climático extremo, mais especificamente da enchente de maio de 2024, em variáveis socioeconômicas municipais do Rio Grande do Sul.

3.1. Análise das bases de dados

Os painéis de dados municipais foram organizados com base em informações disponibilizadas pelo Departamento de Economia e Estatística – DEE/RS, Relação Anual de Informações Sociais – Rais, Cadastro Geral de Admitidos e Demitidos – Caged, Secretaria da Fazenda do Estado do Rio Grande do Sul – Sefaz/RS, Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES), Sistema de Informação em Saúde para a Atenção Básica (Sisab) e do Sistema de Informação de Agravos de Notificação – Sinan. O período das informações é de 01/2020 a 08/2024,

que refletem os períodos pré-tratamento (01/2020 a 04/2024) e pós-tratamento (05/2024 a 08/2024) da enchente de maio de 2024. As variáveis e o período de análise escolhidos ficaram restritos à disponibilidade de informações. Seria desejável ter o maior número possível de informações pós-enchente (pós-tratamento), mas a recente ocorrência dela gerou limitações nesse sentido.

Especificamente, os dados de estoque de vínculos empregatícios, admissões, demissões e o saldo de empregos, foram obtidos do Caged. As informações sobre arrecadação municipal de ICMS foram coletadas junto à Sefaz/RS. Os dados de saúde pública relacionados à atenção básica, como número de visitas domiciliares, procedimentos realizados, procedimentos odontológicos e atendimentos

ocorridos, foram oriundos do Sisab, enquanto o número de notificações de casos de leptospirose foi extraído do Sinan.

Foram consideradas cinco composições diferentes de grupos tratados, de acordo com o percentual da população diretamente atingida pela enchente⁴. A primeira composição, com 72⁵ municípios tratados, corresponde àqueles que tiveram 10% ou mais da população afetada (T10). A segunda, com 42⁶ municípios, compreende aqueles com 20% ou mais de atingidos (T20). A terceira, por sua vez, contendo 27⁷ municípios, abarca aqueles em que 30% ou mais da população foi diretamente afetada pela enchente (T30). Já a quarta composição, com 13⁸ municípios, inclui aqueles em que 40% ou mais da população foi atingida (T40). Por fim, a quinta composição conta com 6⁹ municípios, os quais compreendem aqueles

**Tabela 1. Estatísticas descritivas
(Tratados % da população atingida pela inundação)**

	T10 – Tratados 10% (N=72)		T20 – Tratados 20% (N=42)		T30 – Tratados 30% (N=27)		T40 – Tratados 40% (N=13)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Estoque	195,545	207,201	211,663	222,860	214,572	221,276	258,180	259,570
Admissões	7,953	7,902	8,423	8,244	8,399	7,602	10,284	8,706
Desligamentos	7,396	9,063	7,894	9,551	7,933	10,052	9,837	12,661
Saldo	0,556	-1,162	0,529	-1,306	0,466	-2,451	0,448	-3,954
ICMS	246.875,700	261.221,800	339.235,000	341.256,500	280.607,100	294.882,400	400.714,000	419.796,700
Leptospirose	0,004	0,058	0,005	0,077	0,005	0,105	0,008	0,138
Visitas	260,731	278,570	265,952	250,679	276,179	219,801	263,953	135,028
Odontológicos	25,866	28,115	28,675	30,357	32,026	34,174	27,361	27,026
Procedimentos	402,980	480,911	417,426	471,606	490,251	533,281	474,254	435,701
Atendimentos	268,277	329,210	285,596	337,006	327,226	378,825	325,170	325,413

Fontes: elaboração dos autores com dados do Caged, Sefaz/RS, Sinan, Sisab.
Notas: todas as variáveis estão ponderadas por mil habitantes.

em que 50% ou mais foram afetados (T50). Por outro lado, os municípios considerados como controle, ou seja, não tratados, são aqueles em que até 1% da sua população foi afetada diretamente pela enchente, totalizando 310 municípios.

A Tabela 1 apresenta a média das variáveis de interesse, para as diferentes composições de tratados e para o grupo de controle, considerando os períodos pré-tratamento e pós-tratamento do evento climático extremo em estudo. Com base na Tabela 1, é possível realizar uma análise sintética das variações percentuais entre esses dois períodos para cada uma das variáveis, enfatizando as diferenças entre os grupos tratados (10%, 20%, 30%, 40%, 50%) e o grupo controle. Os cálculos foram obtidos tomando o valor "pré-tratamento" como base para a variação percentual.

Para o mercado de trabalho, é possível evidenciar que todos os grupos apresentaram crescimento no estoque de empregos formais, com variações percentuais mais altas (próximas a 6%) nos grupos T10, T20 e no controle, enquanto T40 e T50 tiveram aumentos bem menores (0,5% e 0,7%, respectivamente). As admissões caem em todos os grupos, mas a queda é significativamente maior nos grupos com maior percentual da população atingida (T40: 15,3%; T50: 23,1%). Além disso, há forte aumento de desligamentos em todos os grupos tratados, crescendo à medida que aumenta o percentual de população atingida. O grupo controle também sobe (15,8%), mas menos do que os tratados. Por fim, em relação ao saldo de emprego, é possível evidenciar a queda abrupta após as inundações, especialmente nos grupos T40 e T50 (quase 1.000% e 1.280%, respectivamente), evidenciando a deterioração mais intensa do mercado de trabalho onde houve maior percentual de atingidos.

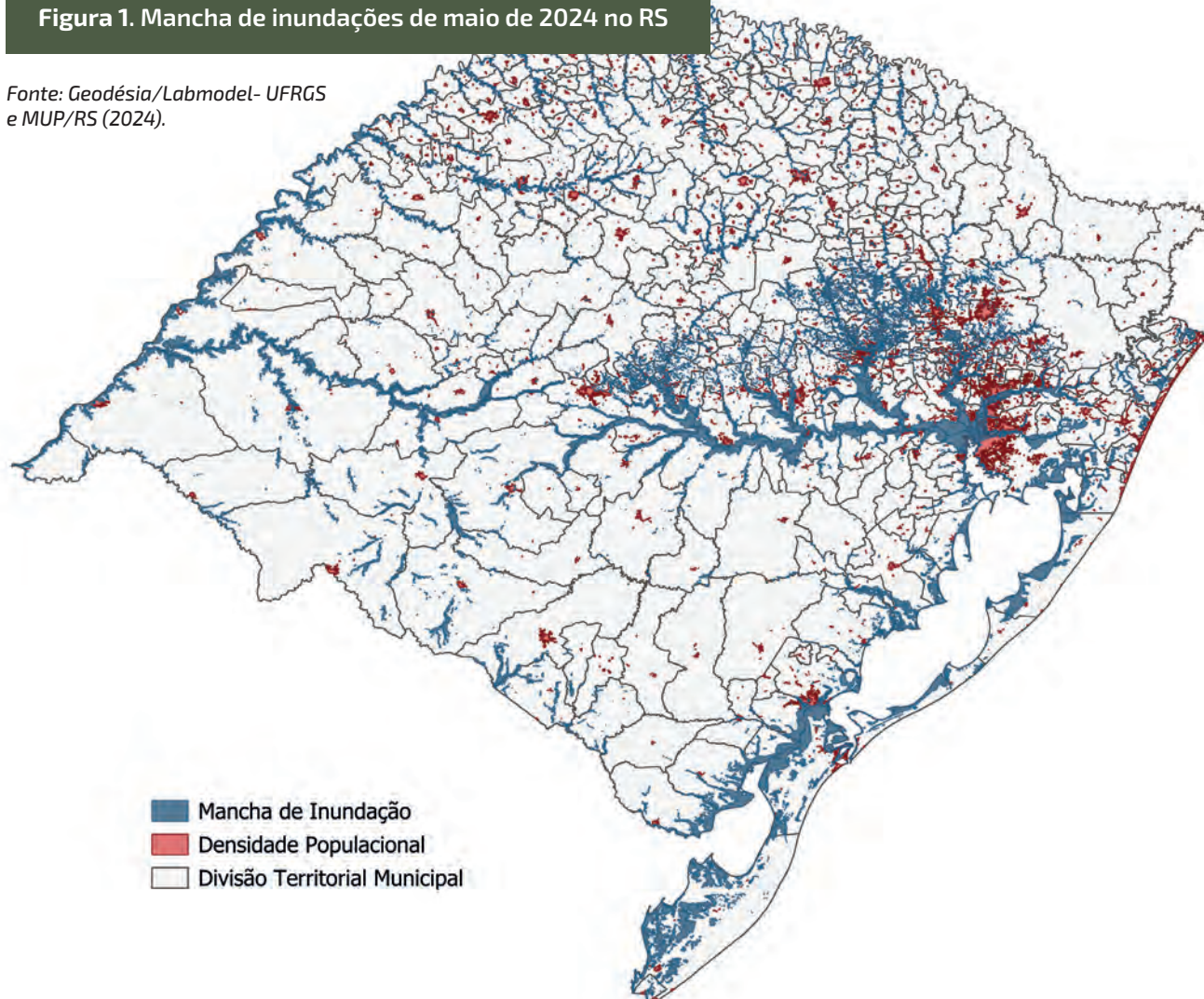
No que se refere à arrecadação municipal, observa-se um aumento de mais de 23% de arrecadação de ICMS para o grupo de controle, bem diferente do observado para os tratados, sobretudo para o grupo T50, que apresentou uma queda de mais de 8% na arrecadação nos períodos pré-tratamento e pós-tratamento. Essa redução da arrecadação dos municípios mais atingidos está refletindo, muito provavelmente, a menor atividade econômica proveniente dos efeitos adversos provocados pela enchente.

Já em relação à incidência de doenças infecciosas, os resultados da Tabela 1 evidenciam que o número de casos de leptospirose nos municípios afetados pela enchente aumentou consideravelmente, sobretudo quando comparado ao grupo de controle. Embora as incidências sejam baixas, o aumento percentual é expressivo, chegando

T50 – Tratados 50% (N=6)		Controles (N=310)	
Antes	Depois	Antes	Depois
300,885	302,910	145,032	152,620
12,031	9,253	5,944	5,749
11,525	15,225	5,494	6,359
0,506	-5,972	0,450	-0,610
326.832,700	299.772,300	88.635,430	109.737,600
0,011	0,145	0,002	0,003
346,765	227,951	309,992	408,440
32,789	31,200	29,451	38,815
557,554	469,012	431,111	613,963
367,638	335,176	294,889	425,365

Figura 1. Mancha de inundações de maio de 2024 no RS

Fonte: Geodésia/Labmodel- UFRGS e MUP/RS (2024).



a 2.000% para o grupo T30, enquanto o mesmo valor para o grupo controle é de 50%. Esse aumento indica uma dinâmica esperada, visto que houve o contato da população com a água contaminada da enchente.

Por fim, os resultados para as variáveis de atenção básica à saúde, número de visitas domiciliares, de atendimentos gerais e odontológicos, e de procedimentos ambulatoriais evidenciam que os municípios afetados (tratados), sobretudo aqueles com maior proporção da população atingida, apresentaram uma redução expressiva na utilização dos serviços básicos de saúde,

provavelmente por dificuldades de acesso ou danos às infraestruturas de saúde.

A Figura 1 apresenta a mancha de inundação da enchente de maio de 2024 gerada a partir dos dados fornecidos pelo Laboratório de Modelagem Ricardo Ayup-LabModel e pelo portal do Mapa Único Plano Rio Grande – MUP. Como pode ser observado, as inundações (em azul no mapa) foram generalizadas em todo o estado, mas, sobretudo, nas regiões metropolitana e dos vales, os quais apresentam densidades populacionais consideráveis (em vermelho no mapa). Por conta disso, a maior parte dos municípios tratados (afetados),

principalmente aqueles que apresentaram maior proporção da população atingida, ficam nessas regiões.

3.2. Abordagem econométrica

No que tange à estratégia empírica adotada, foi utilizado o modelo de diferenças em diferenças com controle de efeitos fixos por município. Tal estratégia se justifica pelo fato da existência de informações ao longo do tempo de grupos distintos de municípios em períodos que antecedem e sucedem a enchente/intervenção (Angrist e Pischke, 2009). Mais precisamente, tem-se à disposição informações tanto de municípios que foram diretamente impactos pela mancha de inundação ao longo do mês de maio de 2024, quanto dos demais municípios que não foram.

O principal problema existente em avaliações de impacto, via modelos econométricos, reside no fato de que à disposição do pesquisador estão apenas as informações referentes ao factual. Idealmente, para o estabelecimento de links causais, seria necessária a observação simultânea do factual e do contrafactual para que se pudesse comparar o desempenho das variáveis dependentes de interesse nos dois cenários, com e sem a intervenção (enchente) objeto da avaliação. No caso deste estudo, seria a comparação, por exemplo, entre o desempenho em termos de variáveis socioeconômicas dos municípios (unidades) impactados pela enchente, o factual, com o desempenho dessas variáveis no cenário em que essas unidades não estão sendo afetadas, mas em períodos em que a enchente ocorreu, o contrafactual. Contudo, observa-se apenas o desempenho das variáveis socioeconômicas dos municípios afetados pelas enchentes diante da existência da intervenção (factual). Portanto, o problema central da avaliação de impacto está na construção de um adequado contrafactual,

que sirva para a realização de um “experimento” válido, ou seja, que permita o estabelecimento de relações causais.

O método de Diff-in-Diff, proposto no presente no estudo, se mostra como alternativa robusta para capturar o efeito médio das enchentes. No entanto, a hipótese de identificação, ou seja, as premissas necessárias para que seja possível identificar o efeito da intervenção sobre as variáveis de interesse dos municípios impactados reside em assumir que, na ausência da intervenção, as trajetórias dessas variáveis para essas unidades de intervenção (municípios) seguiriam trajetórias idênticas às das demais unidades que não foram atingidas pela mancha de inundação. Dessa forma, quaisquer outros choques que pudessem vir a afetar as trajetórias das variáveis de interesse das unidades tratadas (grupo tratado) e das demais unidades, não tratadas (grupo controle), exerceriam a mesma influência. Por exemplo, alguma política pública estadual cujo objetivo seja aumentar a inserção dos trabalhadores no mercado de trabalho deveria ter o mesmo efeito sobre tratados e controles. Assim sendo, quaisquer desvios observados nas trajetórias das variáveis de interesse entre os dois grupos, em períodos posteriores à intervenção de fato, podem ser atribuídos ao efeito das enchentes sobre o grupo de unidades diretamente afetadas¹⁰.

Portanto, neste estudo, será estimada a seguinte equação:

$$Y_{mt} = \alpha + \beta \text{inundacao}_{mt} + \theta_m + \lambda_t + \delta \text{Trend}_{mt} + \varepsilon_{mt} \quad (1)$$

em que Y_{mt} representa as variáveis socioeconômicas de interesse, tais como estoque de empregos, número de trabalhadores admitidos, demitidos, saldo (A-D), arrecadação municipal, variáveis de saúde, entre outras, do município m , no momento t . O termo Inundação_{mt} denota uma

variável *dummy* que assume valor igual a 1 se o município m no momento t foi afetado pela inundação. Já θ_m é um efeito fixo de município, que captura as características não observadas e fixas ao longo do tempo do município m que influenciam as variáveis dependentes.

λ_t são dummies de tempo, que buscam captar fatores conjunturais ao longo do tempo que afetam todos os municípios no tempo t , ε_{mt} é um termo de erro aleatório, e β é o parâmetro a ser estimado, que identifica o impacto do desastre natural sobre os municípios afetados. Em todas as especificações, controla-se pelo termo $Trend_{mt}$, que captura tendências temporais lineares específicas de cada município, levando em consideração quaisquer comportamentos intrínsecos de cada município que ocorram de forma sistemática ao longo do tempo, como, por exemplo, a possibilidade de melhoria contínua no acesso aos serviços básicos de saúde que algum(uns) município(s) pode(m) apresentar. Em outras palavras, essas tendências devem absorver fatores que mudam ao longo do tempo e que podem variar entre os municípios, como a dinâmica climática e características socioeconômicas.

Cabe ressaltar que a variável $Inundação_{mt}$ foi definida considerando as diferentes composições dos grupos de tratamento. Assim, foram estimados cinco diferentes modelos, considerando as composições de tratados T10, T20, T30, T40 e T50, as quais variam com a proporção da população atingida do município (T10: $\geq 10\%$, T20: $\geq 20\%$, T30: $\geq 30\%$, T40: $\geq 40\%$ e T50: $\geq 50\%$). O grupo de controle, por sua vez, é formado por aqueles municípios em que até 1% da população foi atingida pela enchente.

Para testar a validade dos resultados, foram adotadas as seguintes estratégias de robustez. Primeiramente, foi realizado um teste de placebos, em que foi alterada a composição

do grupo de tratamento. Entre todas as unidades consideradas como controles, foram selecionadas aleatoriamente 50% delas para compor um grupo de tratamento fictício. A ideia desse exercício consiste em simular o tratamento sobre unidades que não foram, de fato, tratadas. Se o experimento foi bem conduzido, é esperado que não sejam encontrados efeitos estatisticamente significativos dos desastres sobre essas unidades. Além disso, esse exercício permite que seja identificada a existência de efeitos de equilíbrio geral, ou seja, efeitos do tratamento sobre unidades não diretamente afetadas pelas enchentes.

A outra estratégia de robustez empregada consiste em um teste de falseamento temporal, conforme descrito em Rocha e Soares (2010), no qual é simulada a ocorrência das enchentes em períodos anteriores ao que de fato ela ocorreu. Tal estratégia permite verificar a hipótese central de tendências paralelas prévias para os grupos tratados e controles, condição do método Diff-in-Diff, de forma que se espera que não haja diferenças significativas entre o grupo de tratados e controles nos períodos simulados. Os resultados da análise de robustez estão disponíveis no Apêndice A.

4. Resultados

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados derivados da aplicação da metodologia econométrica para avaliar os impactos das enchentes de maio de 2024 nos municípios do Rio Grande do Sul. O objetivo é compreender como o evento extremo afetou as dimensões econômicas e sociais, considerando diferentes níveis de exposição das populações atingidas. Os resultados são analisados com base em categorias específicas, como mercado de trabalho (estoque, admissões e desligamentos de trabalhadores), arrecadação municipal (ICMS) e saúde pública (incidência de

leptospirose, visitas domiciliares, atendimentos no geral e odontológicos, e procedimentos ambulatoriais), oferecendo uma visão detalhada sobre as consequências imediatas e os desdobramentos a curto prazo.

4.1. Impacto das enchentes sobre o mercado de trabalho, arrecadação e saúde pública

A Tabela 2 apresenta os resultados das estimativas, considerando o efeito médio do desastre sobre os atingidos nos meses subsequentes ao evento. Importante destacar que os meses subsequentes ao evento variaram de acordo com a disponibilidade de dados de cada dimensão avaliada. Para a leptospirose (Coluna 6 da Tabela 2), por exemplo, os dados disponíveis contemplavam apenas um mês após a enchente (junho). Já para as variáveis do mercado de trabalho como o estoque, admissões, desligamentos e saldo de trabalhadores (apresentadas nas Colunas de 1 a 4 na Tabela 2), estavam disponíveis informações para os meses de junho e julho. Por outro lado, a maior disponibilidade de dados foi observada para a arrecadação de ICMS (Coluna 5 da Tabela 2) e os indicadores da atenção básica como o número de visitas domiciliares, atendimentos no geral e odontológicos e procedimentos ambulatoriais (Colunas 7 a 10 da Tabela 2), que possuíam informações para os meses de junho, julho e agosto de 2024, ou seja, três meses após a enchente de maio.

Com relação aos impactos sobre a dinâmica do mercado de trabalho, especificamente sobre o estoque de empregos, os resultados indicam que os efeitos foram estatisticamente significativos e maiores conforme o percentual de pessoas atingidas. Foi estimada, por exemplo, nos municípios com até 10% da população afetada, uma redução de quatro postos de trabalho para cada 1.000 habitantes. Para aqueles com 50% da população impactada, essa redução alcançou 25 vínculos empregatícios a cada mil

habitantes. Dinâmica semelhante ocorreu com o número de admissões nos municípios atingidos: efeitos estatisticamente significativos foram negativos e variaram entre uma diminuição das contratações (-0,6 a cada mil habitantes) nos municípios menos atingidos até -4,2 novas contratações a cada mil habitantes nas localidades mais impactadas. Já para os desligamentos, não foram estimados efeitos estatisticamente significativos. Como resultado dessa dinâmica, houve redução estatisticamente significativa no saldo de empregos mensal, novamente com efeitos crescentes conforme a gravidade da catástrofe no município. Esses resultados indicam um efeito particular das enchentes sobre o mercado de trabalho: não houve aumento do número de demissões no curto prazo, porém houve arrefecimento das novas contratações. Políticas públicas em âmbito nacional e estadual para manutenção dos postos de trabalho e suporte às empresas, como auxílio para o pagamento dos salários, podem ter influenciado esse movimento.

No que se refere à arrecadação dos municípios, principalmente no que diz respeito ao ICMS, todos os grupos afetados tiveram resultados negativos. Ainda assim, apenas nos municípios com mais de 50% da população impactada essas perdas foram estatisticamente significativas, revelando uma queda de aproximadamente R\$117 mil na arrecadação mensal por mil habitantes. A análise do ICMS é crucial nesse contexto, porque se trata de uma das principais fontes de receita das prefeituras, diretamente ligada ao desempenho econômico local e à capacidade de investir em serviços públicos. Dessa forma, os dados apontam que, nos municípios com menor percentual de população atingida, foi possível manter certo nível de atividade econômica, mesmo diante dos prejuízos causados pelas enchentes, possibilitando ainda o atendimento das necessidades das regiões mais afetadas.

Além de causar prejuízos econômicos, as enchentes afetaram de forma significativa o sistema de saúde pública, especialmente no que se refere ao aumento estatisticamente relevante de casos de leptospirose, doença diretamente associada a inundações, pois o contato com águas contaminadas facilita sua transmissão. Em quase todos os grupos de municípios atingidos, com exceção daqueles em que mais de 50% da população foi afetada, houve elevação do número de notificações. Nos locais com 10% da população atingida, observou-se, em média, 0,04 caso novo por mil habitantes; com 20%, foi 0,06; com 30%, 0,09; e com 40%, 0,11 caso a cada mil pessoas. Já nos municípios em que 50% ou mais da população foi afetada, acredita-se que a subnotificação tenha sido consequência da perda de infraestrutura de saúde, dificultando a identificação dos casos. Por isso, é fundamental monitorar de perto essa doença em situações de cheias, a fim de orientar medidas de prevenção, controle e atendimento, considerando o alto risco de transmissão em áreas alagadas.

Os efeitos das enchentes na saúde pública também foram bastante severos na atenção básica. Houve quedas significativas no número de visitas domiciliares, nos procedimentos gerais, nos procedimentos odontológicos e nos atendimentos nas unidades básicas. Para procedimentos gerais, odontológicos e atendimentos, a queda foi maior à medida que crescia a porcentagem de pessoas atingidas. Os procedimentos gerais diminuíram entre 70 e 240 para cada mil habitantes; já os procedimentos odontológicos caíram de seis a 16 para cada mil pessoas. Nos atendimentos, a redução variou de 35 a 154 por mil habitantes. Em relação às visitas domiciliares, não houve uma relação direta com o grau de gravidade da enchente, onde nos municípios com até 30% da população afetada, houve diminuição

de 88 visitas por mil habitantes, enquanto nas cidades mais impactadas não foram observados resultados estatisticamente relevantes.

De modo geral, os resultados mostram que as enchentes de maio de 2024 trouxeram efeitos negativos para a economia, reduzindo o ritmo do mercado de trabalho e a arrecadação. O principal reflexo foi a diminuição das admissões, afetando diretamente o saldo de empregos. Além disso, a arrecadação mensal de ICMS foi prejudicada nos municípios com maior exposição às enchentes, evidenciando também a queda nas atividades econômicas.

Esses resultados negativos de curto prazo confirmam o que a literatura já indica: desastres naturais de grande proporção tendem a provocar retração econômica e a reduzir o crescimento das regiões afetadas (Ribeiro *et al.*, 2014; Klomp; Valckx, 2014, Lima; Barbosa, 2019). Os danos sobre o capital físico, humano, social, ambiental e tecnológico ajudam a explicar esses impactos. Com o tempo, essa situação pode se agravar, já que os efeitos indesejáveis continuam existindo mesmo com o volume de recursos investidos em reconstrução e assistência, sobretudo por parte do poder público. Em outras palavras, embora os repasses financeiros, linhas de crédito e políticas de auxílio possam atenuar parte dos prejuízos, não eliminam completamente as consequências negativas para a economia local.

Por fim, verificou-se que as enchentes reduziram o acesso ao sistema de saúde dos municípios diretamente afetados, e isso se deu em praticamente todos os níveis de exposição, se intensificando com o percentual de população atingida. Essas evidências corroboram o exposto por Alderman *et al.* (2012), Berlemann e Wenzel (2018) e Kousky (2014), que identificam uma série de efeitos negativos sobre a saúde pública em detrimento

Tabela 2. Impacto das enchentes sobre o mercado de trabalho, arrecadação e o setor de saúde, para diferentes grupos de tratamento.

Tratamentos	(1) Estoque	(2) Admissões	(3) Desligamentos	(4) Saldo	(5) ICMS	(6) Leptospirose	(7) Visitas	(8) Odontológicos	(9) Procedimentos	(10) Atendimentos
Tratamento (≥10%)	-4,0421** (1,7104)	-0,6437* (0,3468)	0,2105 (0,3064)	-0,8542** (0,4321)	-3.679,3979 (11.563,8224)	0,0490*** (0,0150)	-40,1262** (17,4478)	-6,3182*** (1,4968)	-70,4961*** (17,7097)	-35,5675*** (10,6948)
Observações	21.010	21.010	21.010	21.010	21.392	20.628	21.104	21.176	21.356	21.380
R-quadrado	0,6714	0,1527	0,1336	0,0688	0,1580	0,0642	0,4084	0,4384	0,6608	0,6471
Número de municípios	382	382	382	382	382	382	380	382	382	382
Tratamento (≥20%)	-6,2468*** (2,3469)	-0,9135** (0,4333)	0,1309 (0,4161)	-1,0444* (0,5608)	-22.207,3256 (15.710,7743)	0,0653*** (0,0243)	-57,6226** (22,5051)	-8,0736*** (1,9501)	-95,0479*** (24,4150)	-54,1008*** (14,7027)
Observações	19.360	19.360	19.360	19.360	19.712	19.008	19.424	19.496	19.676	19.700
R-quadrado	0,6602	0,1460	0,1281	0,0675	0,1552	0,0625	0,4099	0,4414	0,6595	0,6486
Número de municípios	352	352	352	352	352	352	350	352	352	352
Tratamento (≥30%)	-8,6357*** (2,9923)	-1,5183*** (0,5350)	0,5851 (0,5421)	-2,1034*** (0,6714)	-21.603,6510 (19.726,7550)	0,0911** (0,0366)	-88,4191*** (32,0637)	-9,7810*** (2,5474)	-134,4873*** (30,7353)	-72,0303*** (17,0497)
Observações	18.535	18.535	18.535	18.535	18.872	18.198	18.584	18.656	18.836	18.860
R-quadrado	0,6423	0,1401	0,1251	0,0672	0,2144	0,0671	0,4115	0,4426	0,6616	0,6504
Número de municípios	337	337	337	337	337	337	335	337	337	337
Tratamento (≥40%)	-15,1556*** (4,7101)	-2,2588*** (0,7598)	1,2608 (0,9027)	-3,5196*** (1,1183)	-24.842,4350 (37.442,8814)	0,1154** (0,0577)	-86,3215* (49,4669)	-11,1263*** (3,9353)	-191,0720*** (48,2003)	-112,6327*** (24,9578)
Observações	17.765	17.765	17.765	17.765	18.088	17.442	17.800	17.896	18.052	18.076
R-quadrado	0,6358	0,1366	0,1227	0,0667	0,2165	0,0617	0,4092	0,4418	0,6643	0,6527
Número de municípios	323	323	323	323	323	323	321	323	323	323
Tratamento (≥50%)	-25,6963*** (7,5533)	-4,2426*** (0,8869)	1,4746 (1,8484)	-5,7172*** (1,8812)	-117.605,9348** (54.243,1985)	0,1143 (0,1117)	-58,4045 (91,3322)	-16,8118** (7,0930)	-240,9093*** (90,3159)	-154,4245*** (40,5464)
Observações	17.380	17.380	17.380	17.380	17.696	17.064	17.408	17.528	17.660	17.684
R-quadrado	0,6352	0,1345	0,1214	0,0659	0,2236	0,0450	0,4127	0,4420	0,6642	0,6533
Número de municípios	316	316	316	316	316	316	314	316	316	316
Efeito fixo de Municípios	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Efeito fixo de tempo	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Tenência específica de município	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fontes: Elaboração dos autores com dados do Caged, Sefaz/RS, Sinan, Sisab

Notas:

- Todas as variáveis dependentes estão ajustadas por mil habitantes.
- Os erros-padrão foram calculados de forma a considerar semelhanças entre os municípios (cluster), garantindo mais precisão nas estimativas.
- Os símbolos ***($p<0,01$), **($p<0,05$) e *($p<0,1$) indicam diferentes graus de confiança nos resultados estatísticos, sendo o nível *** o mais rigoroso e o nível * o menos exigente.

dos desastres naturais, sobretudo, nas localidades menos desenvolvidas. Em virtude dos danos aos postos de saúde, perda de infraestrutura, dificuldades de mobilidade e do número de pessoas afetadas, houve redução no número de procedimentos, procedimentos odontológicos, visitas e atendimentos em Unidades Básicas.

5. Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo avaliar os impactos socioeconômicos das enchentes de maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul, evento que ficou marcado como a maior catástrofe natural da história do Brasil. Além do elevado potencial destrutivo, que devastou regiões inteiras, a magnitude do desastre foi agravada pela longa duração, com alguns municípios permanecendo submersos por mais de 30 dias. Essa combinação de intensidade e duração evidencia a gravidade do fenômeno e seus impactos generalizados.

A avaliação dos efeitos dessa catástrofe enfrentou desafios relacionados à disponibilidade e tempestividade dos dados. Para superar essas limitações, foi construído um painel de dados mensal em nível municipal, abrangendo o período de janeiro de 2020 a agosto de 2024. Foram coletadas informações sobre a dinâmica do mercado de trabalho, arrecadação fiscal e saúde pública, além de dados que identificam o número de pessoas diretamente afetadas em cada município. Essa base permitiu uma análise abrangente e detalhada dos impactos do evento.

Dada a complexidade de mensurar os efeitos causais de um desastre dessa magnitude, foi utilizada a metodologia de diferenças em diferenças, uma abordagem robusta para a análise de fenômenos classificados como quase experimentos. Essa técnica possibilitou

a identificação e mensuração dos impactos atribuíveis às enchentes, considerando variações temporais e entre diferentes grupos de municípios.

Em síntese, as enchentes ocorridas em maio de 2024 geraram impactos negativos na economia, desacelerando o ritmo do mercado de trabalho e prejudicando a arrecadação. A redução nas admissões foi o principal reflexo, influenciando diretamente o saldo de empregos. Além disso, a queda na arrecadação mensal de ICMS, nos municípios com maior exposição às enchentes, reforçou o declínio das atividades econômicas. Verificou-se também que as enchentes prejudicaram o acesso ao sistema de saúde nos municípios diretamente afetados, abrangendo praticamente todos os níveis de exposição e se intensificando conforme aumentava o percentual de população atingida. Isso está diretamente associado aos danos aos postos de saúde, perda de infraestrutura, dificuldades de mobilidade e quantidade de pessoas afetadas, ocorrendo assim redução no número de procedimentos, incluindo os odontológicos, além de diminuição nas visitas e atendimentos em Unidades Básicas.

Vale ressaltar que os resultados encontrados não são imunes a limitações metodológicas, entre elas aos possíveis efeitos de transbordamentos (não controlados) gerados pelos municípios com maior percentual de população diretamente impactada pela enchente. Embora as estimativas tenham controlado uma série de fatores observáveis e não observáveis que possam interferir no resultado, além de uma gama de análise de robustez, é possível que existam municípios afetados influenciando seus vizinhos mais próximos, de modo a gerar maior procura por assistência à saúde e inserção no mercado de trabalho, entre outros efeitos, que as

estimativas realizadas podem não estar captando. Entretanto, essas abordagens podem servir para uma agenda de estudos futuros acerca da temática abordada.

Por fim, espera-se que os resultados apresentados contribuam de maneira efetiva para a formulação de estratégias mais eficazes e resilientes frente a futuros desastres, promovendo não apenas a recuperação das áreas afetadas, mas também a construção de sistemas mais preparados para lidar com desafios climáticos de grande escala que minimizem as perdas de bem-estar das populações afetadas.

¹ Estudo desenvolvido com o apoio da Secretaria Especial da Reconstrução do Governo Federal e da Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo – FESPSP.

² https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/06/NT_Evento_climatico_extremo_RS_maio_2024_Final.pptx.pdf

³ <https://mup.rs.gov.br/>.

⁴ O percentual da população atingida por município foi obtido do Mapa Único Plano Rio Grande – MUP (<https://mup.rs.gov.br/0>).

⁵ Agudo, Alvorada, Anta Gorda, Arambaré, Arroio do Meio, Arroio do Tigre, Arroio dos Ratos, Barra do Ribeiro, Barra do Rio Azul, Bom Princípio, Candelária, Canoas, Canudos do Vale, Casca, Cerro Branco, Charqueadas, Colinas, Cotiporã, Cristal do Sul, Cruzeiro do Sul, Dois Lajeados, Eldorado do Sul, Encantado, Entre Rios do Sul, Esteio, Estrela, Feliz, Forquetinha, General Câmara, Guaíba, Ibarama, Igrejinha, Imigrante, Itaquí, Lajeado, Maquiné, Marques de Souza, Montenegro, Muçum, Nova Bassano, Nova Palma, Nova Santa Rita, Novo Hamburgo, Palmares do Sul, Pareci Novo, Pelotas, Pirapó, Ponte Preta, Porto Mauá, Putinga, Relvado, Restinga Seca, Rio Grande, Rio Pardo, Roca Sales, Rolante, Santa Tereza, Serafina Corrêa, Silveira Martins, Sinimbu, Sobradinho, São Jerônimo, São José do Norte, São Leopoldo, São Lourenço do Sul, São Sebastião do Caí, Taquari, Travesseiro, Triunfo, Três Coroas, Venâncio Aires, Vila Maria.

⁶ Anta Gorda, Arambaré, Arroio do Meio, Canoas, Canudos do Vale, Casca, Cerro Branco, Charqueadas, Colinas, Cruzeiro do Sul, Dois Lajeados, Eldorado do Sul, Encantado, Esteio, Estrela, Feliz, Forquetinha, Guaíba, Igrejinha, Imigrante, Maquiné, Marques de Souza, Muçum, Nova Santa Rita, Pareci Novo, Ponte Preta, Putinga, Relvado, Rio Grande, Rio Pardo, Roca Sales, Rolante, Santa Tereza, Sobradinho, São Jerônimo, São José do Norte, São Leopoldo, São Lourenço do Sul, São Sebastião do Caí, Travesseiro, Triunfo, Três Coroas.

⁷ Arambaré, Arroio do Meio, Canoas, Canudos do Vale, Cerro Branco, Colinas, Cruzeiro do Sul, Dois Lajeados, Eldorado do Sul, Encantado, Estrela, Forquetinha, Guaíba, Igrejinha, Imigrante, Maquiné, Marques de Souza, Muçum, Pareci Novo, Relvado, Rio Grande, Roca Sales, Santa Tereza, São Leopoldo, São Sebastião do Caí, Travesseiro, Três Coroas.

⁸ Arambaré, Arroio do Meio, Canoas, Colinas, Cruzeiro do Sul, Eldorado do Sul, Igrejinha, Marques de Souza, Muçum, Roca Sales, São Leopoldo, São Sebastião do Caí, Travesseiro.

⁹ Arambaré, Eldorado do Sul, Igrejinha, Muçum, Roca Sales, Travesseiro.

¹⁰ Para outros exemplos de aplicações do método de diferenças em diferenças para avaliações de impacto e estabelecimento de relações causais, ver Postali (2009), Rocha e Soares (2010) e Ponczek, Souza e Emerson (2016).

Referências

- ALDERMAN, K.; TURNER, L. R.; TONG, S. Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, v. 47, 2012, p. 37-47.
- ANGRIST, Joshua D.; PISCHKE, Jörn-Steffen. *Mostly harmless econometrics: an empiricist's companion*. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- BERGHOLT, D.; LUJALA, P. Climate-related natural disasters, economic growth, and armed civil conflict. *Journal of Peace Research*, v. 49, n. 1, 2012, p. 147-162.
- BERLEMANN, M.; WENZEL, D. Hurricanes, economic growth and transmission channels. *World Development*, v. 105, 2018, p. 231-247.
- CARMO, R. L. do; ANAZAWA, T. M. Mortalidade por desastres no Brasil: o que mostram os dados. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 19, n. 9, 2014, p. 3.669-3.681.
- CHHIBBER, A.; LAAJAJ, R. Disasters, climate change and economic development in Sub-Saharan Africa: lessons and directions. *Journal of African Economies*, v. 17, n. suppl_2, 2008, p. ii7-ii49.
- DU, Weiwei et al. Health impacts of floods. *Prehospital and Disaster Medicine*, [s.l.], v. 25, n. 3, 2010, p. 265-272.
- ECONOMIC INSTITUTE OF CAMBODIA (EIC). *A study on impact of disasters on the education sector in Cambodia*. Bangkok: ADPC, 2008.
- FONSECA, E. L. et al. *Os impactos do evento climático de maio de 2024 sobre a cobertura e o uso da terra no Rio Grande do Sul*. Mapbiomas, 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/06/NT_Evento_cli-matico_extremo_RS_maio_2024_Final.pptx.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.
- GOVERNO DO RIO GRANDE DO SUL. *Mapa Único do Plano Rio Grande (MUP-RS)*. Disponível em: <https://planoriogrande.rs.gov.br/mapa-unico>. Acesso em: 16 set. 2024.
- HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. Economic impacts of natural disasters in megacities: the case of floods in São Paulo, Brazil. *Habitat International*, v. 45, 2015, p. 106-113.
- HALLEGATTE, S. *Natural disasters and climate change: an economic perspective*. [S.l.]: Springer, 2014.
- HOCHRAINER, S. *Assessing the macroeconomic impacts of natural disasters: Are there any?* World Bank, jun. 2009. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/684891468176993293/Assessing-the-macroeconomic-impacts-of-natural-disasters-are-there-any>. Acesso em: 11 mar. 2018.

HSIANG, S. M.; JINA, A. S. *The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: evidence from 6,700 cyclones*. National Bureau of Economic Research, Working Paper, n. 20352, jul. 2014. Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w20352>. Acesso em: 19 out. 2017.

KLOMP, J.; VALCKX, K. Natural disasters and economic growth: a meta-analysis. *Global Environmental Change*, v. 26, 2014, p. 183-195.

KOUSKY, C. Informing climate adaptation: a review of the economic costs of natural disasters. *Energy Economics*, v. 46, 2014, p. 576-59.

LIMA, R. C. de A.; BARBOSA, A. V. B. Natural disasters, economic growth and spatial spillovers: evidence from a flash flood in Brazil. *Papers in Regional Science*, v. 0, n. 0, jun. 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pirs.12380>. Acesso em: 27 dez. 2018.

NOY, I.; VU, T. B. The economics of natural disasters in a developing country: the case of Vietnam. *Journal of Asian Economics*, v. 21, n. 4, 2010. p. 345-354.

PACHAURI, R. K. et al. *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [S.l.]: IPCC, 2014.

PONCZEK, V. P.; SOUZA, A. P.; EMERSON, P. Child labor and learning. *Economic Development and Cultural Change*, Chicago, IL, 2016.

RIBEIRO, F. G. et al. O impacto econômico dos desastres naturais: o caso das chuvas de 2008 em Santa Catarina. *Planejamento e Políticas Públicas*, v. 0, n. 43, 2014. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/470>. Acesso em: 19 out. 2017.

ROCHA, Romero; SOARES, Rodrigo R. Evaluating the impact of community-based health interventions: evidence from Brazil's Family Health Program. *Health Economics*, v. 19, n. S1, 2010, p. 126-158.

SKIDMORE, M.; TOYA, H. Do natural disasters promote long-run growth? *Economic Inquiry*, v. 40, n. 4, 2002, p. 664-687.

STROBL, E. The economic growth impact of hurricanes: evidence from U.S. coastal counties. *The Review of Economics and Statistics*, v. 93, n. 2, 2010, p. 575-589.

TOYA, H.; SKIDMORE, M. Economic development and the impacts of natural disasters. *Economics Letters*, v. 94, n. 1, 2007, p. 20-25.

WHO; WMO. *Atlas of health and climate*. Geneva: World Health Organization, 2012.

WOOD, Michele M.; BOURQUE, Linda B. Morbidity and mortality associated with disasters. *Handbook of Disaster Research*. [S.l.]: Springer, 2018, p. 357-383.

WORLD BANK; UNITED NATIONS. Natural hazards, unnatural disasters: the economics of effective prevention. [S.l.]: The World Bank, 2010. Disponível em: <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-0-8213-8050-5>. Acesso em: 9 jul. 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Flooding and communicable diseases fact sheet. *Weekly Epidemiological Record*, v. 80, n. 03, 2005, p. 21-28.

Equipe de trabalho

Gibran da Silva Teixeira

Doutor em Economia. Professor associado II do Instituto de Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis Iceac da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada – PPGE-FURG.

Pedro Henrique Soares Leivas

Doutor em Economia. Professor adjunto do Instituto de Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis da Universidade Federal do Rio Grande e docente permanente do Programa de Pós-graduação em Economia Aplicada – PPGE-FURG.

Vinicius Halmenschlager

Doutor em Economia. Professor adjunto da Faculdade de Ciências Econômicas (FCE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada (PPGE) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Marcio Nora Barbosa

Doutor em Economia. Professor assistente do Instituto de Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis da Universidade Federal do Rio Grande e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada – PPGE-FURG.

Tatiana Silva da Silva

Doutora em Oceanologia. Professora associada do Departamento de Geodésia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (UFRGS).

Alisson Fiorentin

Mestrando em Economia Aplicada – PPGE-FURG e graduado em Matemática Aplicada com ênfase em Economia Matemática pela FURG.

José Nunes de Aquino:

Doutor em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

APÊNDICE A - Análise de robustez

Para verificar a consistência dos resultados, foram usadas duas estratégias de robustez. Primeiro, realizou-se um teste de placebos, em que parte dos municípios não afetados foi aleatoriamente designada como tratada, para identificar eventuais efeitos espúrios em áreas sem enchentes reais. Em seguida, aplicou-se um teste de falseamento temporal (Rocha e Soares, 2010), simulando a ocorrência das enchentes em períodos anteriores ao fato, a fim de avaliar se já existiam diferenças entre os grupos antes do evento. Essas duas abordagens reforçam a confiabilidade do método de diferenças em diferenças utilizado neste estudo.

Dessa forma, com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados obtidos nas estimativas realizadas e apresentadas nos resultados, as Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados dos testes de robustez. A primeira estratégia foi o teste de placebos, que alterou a composição do grupo de tratamento. Entre os municípios com menos de 1% da população atingida, selecionou-se aleatoriamente 50% dessas localidades, que foram então consideradas, de forma hipotética, como tendo sido afetadas pela enchente.

Os resultados da Tabela 3 indicam que não foram estimados efeitos significativos das enchentes sobre essas localidades, como esperado. Se efeitos significativos fossem observados, haveria indícios de que o experimento conduzido na estratégia empírica principal poderia estar capturando outros fatores que afetam as variáveis de interesse para além dos efeitos das enchentes. Além disso, a ausência de efeitos na Tabela 3 aponta para a ausência de efeitos de equilíbrio geral da enchente, ou seja, municípios considerados como grupo de comparação nas análises,

que não foram afetados pelas enchentes, não tiveram impactos socioeconômicos decorrentes do fenômeno.

Já a Tabela 4 apresenta a segunda estratégia de robustez empregada, que consiste num teste de falseamento temporal, no qual é simulada a ocorrência das enchentes para períodos anteriores a maio de 2024. Essa abordagem busca verificar se a hipótese central de tendências paralelas prévias entre os grupos tratados e controles se confirma.

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que o experimento estimado foi válido para a maioria das variáveis, com alterações pouco substanciais entre as estimativas para os diferentes grupos de afetados. Desta forma, a análise empregada se mostra robusta para tais desfechos. Por outro lado, para o estoque de emprego, o experimento não ficou ajustado. Foram observados efeitos fortes e significativos para os períodos anteriores a maio de 2024 nas estimativas para todos os grupos de impactados. Essas evidências sugerem que já havia diferenças prévias no que concerne ao estoque de empregos entre os grupos atingidos pela enchente e aqueles municípios que não foram atingidos (grupo de comparação), dificultando assim a análise causal das enchentes sobre a variável de estoque de emprego formal, porém as demais variáveis dos modelos estimados se mostraram consistentes e podem ser avaliadas de forma segura e consistente.

Tabela 3. Placebo - Seleção aleatória dos tratados no grupo de controle (T = 155 e C = 155)

	(1) Estoque	(2) Admissões	(3) Desligamentos	(4) Saldo	(5) ICMS	(6) Leptospirose	(7) Visitas	(8) Odontológicos	(9) Procedimentos	(10) Atendimentos
Placebo	-0,8288 (1,7453)	0,3391 (0,3813)	0,1772 (0,3392)	0,1619 (0,3770)	3.854,9979 (10.285,2045)	0,0021 (0,0020)	-5,8760 (13,0098)	1,0680 (1,3639)	4,8090 (14,1803)	-8,4815 (9,6476)
Observações	17.050	17.050	17.050	17.050	17.360	16.740	17.072	17.192	17.324	17.348
R-quadrado	0,6297	0,1303	0,1184	0,0625	0,2213	0,0321	0,4228	0,4382	0,6699	0,6558
Número de municípios	310	310	310	310	310	310	308	310	310	310
Efeito fixo de municípios	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Efeito fixo de tempo	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Tenência específica de município	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fontes: Elaboração dos autores com dados do Caged, Sefaz/RS, Sinan, Sisab.

Notas:

- Todas as variáveis dependentes estão ajustadas por mil habitantes.
- Os erros-padrão foram calculados de forma a considerar semelhanças entre os municípios (cluster), garantindo mais precisão nas estimativas.
- Os símbolos ***($p < 0,01$), **($p < 0,05$) e *($p < 0,1$) indicam diferentes graus de confiança nos resultados estatísticos, sendo o nível *** o mais rigoroso e o nível * o menos exigente.

Tabela 4. Leads and Lags

VARIÁVEIS	(1) Estoque	(2) Admissões	(3) Desligamentos	(4) Saldo	(5) ICMS	(6) Leptospirose	(7) Visitas	(8) Odontológicos	(9) Procedimentos	(10) Atendimentos
10%										
Lag (t-3)	-4,4424** (1,7215)	0,2115 (0,7520)	0,6547 (1,1631)	-0,4432 (1,1197)	-8.696,2025 (10.464,2561)	-0,0063 (0,0041)	13,6599 (17,7336)	0,1118 (1,4233)	-13,6922 (18,0450)	-1,1050 (11,5829)
Lag (t-2)	-3,3220* (1,7016)	0,3289 (0,4887)	-0,9811* (0,5288)	1,3100* (0,7471)	4.152,7032 (14.308,1366)	-0,0071** (0,0033)	25,2194 (17,1741)	-1,3789 (1,7490)	-43,1408 (29,9131)	-20,2479 (17,5018)
Lag (t-1)	-2,2969 (1,6734)	0,7517** (0,3665)	-0,4605 (0,3120)	1,2122*** (0,4144)	25.345,6369** (12.757,8577)	-0,0036 (0,0032)	8,2794 (18,3688)	-2,3440 (1,5078)	-60,3573*** (21,4113)	-33,8060** (15,9408)
Tratamento	-4,4989** (1,9081)	-2,2681*** (0,4876)	-0,2507 (0,4606)	-2,0173*** (0,6852)	-57.512,0968** (25.861,1416)	0,0968*** (0,0299)	-37,7442 (23,2564)	-11,0406*** (2,6506)	-154,3077*** (30,1243)	-91,2615*** (18,0102)
Lead (t+1)	-5,0319** (2,0828)	0,0918 (0,4698)	0,4426 (0,3542)	-0,3508 (0,5598)	-8.244,0587 (28.691,4988)	-0,0016 (0,0049)	-33,1369 (22,1625)	-6,9889*** (1,6870)	-73,5889*** (22,2848)	-30,6255** (13,7254)
Lead (t+2)	-4,8995** (2,1385)	0,5664* (0,3172)	0,2543 (0,3236)	0,3121 (0,3507)	22.715,2686 (23.233,7683)		-54,2566** (22,7919)	-3,9146** (1,7225)	-48,5446** (20,6660)	-17,8760 (12,9971)
Lead (t+3)					36.617,5416* (20.405,9142)		-20,5704 (22,4599)	-4,3806** (1,7979)	-40,7153* (21,9760)	-18,8830 (13,7397)

Tabela 4. Leads and Lags (continuação)

VARIÁVEIS	(1) Estoque	(2) Admissões	(3) Desligamentos	(4) Saldo	(5) ICMS	(6) Leptospirose	(7) Visitas	(8) Odontológicos	(9) Procedimentos	(10) Atendimentos
Observações	21.010	21.010	21.010	21.010	21.392	20.628	21.104	21.176	21.356	21.380
R-quadrado	0,6717	0,1534	0,1339	0,0694	0,1589	0,0788	0,4085	0,4388	0,6617	0,6478
Número de municípios	382	382	382	382	382	382	380	382	382	382
20%										
Lag (t-3)	-6,7828*** (2,2525)	0,3275 (0,8580)	0,9889 (1,5616)	-0,6614 (1,4742)	-14.548,8770 (12.627,9568)	-0,0096* (0,0051)	12,9713 (20,7315)	-0,6090 (1,6962)	-16,0859 (26,1905)	-11,4495 (16,2226)
Lag (t-2)	-5,6707*** (2,0986)	0,2279 (0,5080)	-1,1321* (0,5914)	1,3600* (0,8039)	7.835,2555 (18.696,7869)	-0,0101** (0,0044)	5,5998 (24,6799)	-2,1500 (2,2112)	-75,1729 (47,5115)	-48,9518* (25,6306)
Lag (t-1)	-4,3126** (2,0485)	1,0012** (0,5021)	-0,6002 (0,3879)	1,6014*** (0,5539)	31.622,4953* (18.451,1844)	-0,0057 (0,0046)	2,9865 (21,1665)	-3,0101 (2,1622)	-71,7719** (31,1166)	-48,7232*** (18,6380)
Tratamento	-7,4116*** (2,5123)	-3,0835*** (0,6254)	-0,2234 (0,6171)	-2,8601*** (0,9491)	-95.917,2101** (39.163,1044)	0,1311*** (0,0486)	-74,7814** (29,2141)	-15,0104*** (3,7887)	-205,0857*** (43,9702)	-131,1387*** (24,0587)
Lead (t+1)	-7,5911*** (2,8694)	0,4789 (0,6693)	0,4241 (0,4606)	0,0548 (0,7861)	-46.922,1745 (44.831,8020)	-0,0046 (0,0075)	-62,7613** (29,5231)	-8,2053*** (2,2954)	-102,6591*** (30,9249)	-55,0314*** (18,7911)
Lead (t+2)	-7,5816*** (2,8886)	0,2506 (0,3838)	0,0114 (0,4389)	0,2393 (0,4412)	17.871,9043 (37.080,1553)		-64,0141** (27,6995)	-5,0552** (2,0403)	-63,0316** (27,3069)	-31,0273* (17,4791)
Lead (t+3)					46.682,5408 (31.126,4017)		-21,5466 (21,0889)	-5,7360*** (2,0667)	-58,3875* (30,4575)	-31,9770* (18,6264)
Observações	19.360	19.360	19.360	19.360	19.712	19.008	19.424	19.496	19.676	19.700
R-quadrado	0,6607	0,1468	0,1285	0,0682	0,1567	0,0813	0,4100	0,4419	0,6606	0,6497
Número de municípios	352	352	352	352	352	352	350	352	352	352
30%										
Lag (t-3)	-5,3253** (2,4250)	1,2084 (0,9884)	2,1300 (2,3253)	-0,9216 (2,1553)	-10.340,7134 (14.137,6857)	-0,0147** (0,0067)	12,3352 (26,7090)	-0,8420 (1,8678)	-56,3404 (36,6359)	-27,6836 (22,0478)
Lag (t-2)	-4,6739* (2,4158)	0,0330 (0,6765)	-0,7638 (0,5880)	0,7968 (0,9248)	29.325,1294 (23.395,5934)	-0,0161*** (0,0058)	-5,5679 (34,1034)	-5,7451* (2,9442)	-148,7929** (67,6014)	-77,3413** (37,0660)
Lag (t-1)	-3,8813 (2,5089)	0,2185 (0,4990)	-0,7127 (0,4464)	0,9312* (0,5375)	46.057,1222* (26.187,1943)	-0,0123* (0,0063)	0,7943 (29,2304)	-5,2172* (2,7957)	-114,6117*** (38,1263)	-55,3264** (26,6338)
Tratamento	-8,6794*** (3,1651)	-3,9028*** (0,7583)	0,7634 (0,7702)	-4,6662*** (1,1661)	-82.392,6920* (49.868,7475)	0,1818** (0,0732)	-107,3593*** (40,5558)	-20,7621*** (5,1276)	-295,4477*** (55,9090)	-178,2523*** (29,9026)
Lead (t+1)	-10,0884*** (3,6791)	-0,2629 (0,8647)	1,0209* (0,5811)	-1,2838 (0,9518)	-20.320,6658 (35.757,5123)	-0,0066 (0,0115)	-98,3052** (41,4972)	-10,8573*** (2,9617)	-154,6034*** (40,2693)	-78,2281*** (24,3086)

Tabela 4. Leads and Lags (continuação)

VARIÁVEIS	(1) Estoque	(2) Admissões	(3) Desligamentos	(4) Saldo	(5) ICMS	(6) Leptospirose	(7) Visitas	(8) Odontológicos	(9) Procedimentos	(10) Atendimentos
Lead (t+2)	-10,3363*** (3,6859)	-0,0327 (0,5106)	0,0968 (0,5448)	-0,1295 (0,5281)	-12.135,9983 (38.749,3369)		-103,0124*** (38,7108)	-6,2317** (2,6168)	-97,0001*** (35,7071)	-40,1235* (20,4597)
Lead (t+3)					51.161,6209 (33.881,0111)		-41,8303 (28,6855)	-4,8832** (2,2031)	-87,6919** (37,8709)	-39,4972* (22,1166)
Observações	18.535	18.535	18.535	18.535	18.872	18.198	18.584	18.656	18.836	18.860
R-quadrado	0,6426	0,1408	0,1256	0,0677	0,2157	0,0925	0,4116	0,4436	0,6635	0,6519
Número de municípios	337	337	337	337	337	337	335	337	337	337
40%										
Lag (t-3)	-8,8857** (3,8385)	1,7207 (1,0855)	-0,7206 (0,6475)	2,4413** (1,1578)	-1.601,0278 (18.654,1127)	-0,0194 (0,0126)	14,0364 (44,2025)	-0,3772 (3,2297)	-62,6068 (60,9268)	-30,1338 (30,5190)
Lag (t-2)	-8,1643** (4,0899)	0,5610 (0,7094)	-0,7467 (0,6640)	1,3077 (1,0886)	62.981,4464 (40.164,7606)	-0,0265** (0,0106)	0,4175 (40,4369)	-3,0999 (3,0384)	-101,0432 (65,1229)	-62,9414* (33,2981)
Lag (t-1)	-7,4810* (4,3095)	0,5193 (0,6384)	-0,7548 (0,6723)	1,2741** (0,5480)	74.593,5835 (45.302,3454)	-0,0186 (0,0125)	20,9558 (36,2953)	-4,3262 (5,0152)	-123,0236* (71,3409)	-71,0549* (41,7843)
Tratamento	-14,3502*** (4,9921)	-5,2835*** (1,1247)	0,9905 (1,1690)	-6,2739*** (1,8284)	-85.973,0643 (79.891,6833)	0,2273* (0,1156)	-91,5585 (61,5161)	-20,2681*** (7,6214)	-326,9254*** (65,5905)	-211,6176*** (38,6446)
Lead (t+1)	-18,1388*** (5,8312)	-1,4335 (0,9522)	1,7554* (1,0594)	-3,1889*** (1,1253)	-49.978,5730 (69.211,1338)	-0,0068 (0,0235)	-102,9907* (62,1420)	-10,1256** (4,2359)	-201,5483*** (65,4773)	-123,6505*** (37,5461)
Lead (t+2)	-18,6460*** (5,8307)	0,6185 (0,7357)	0,5214 (0,9802)	0,0971 (0,7870)	-11.343,0056 (76.620,6770)		-102,0897* (60,7236)	-9,6744** (4,4735)	-168,2820*** (61,6082)	-86,5055*** (30,1326)
Lead (t+3)					93.714,4945* (50.326,6681)		-36,7664 (48,6481)	-6,8076** (3,3988)	-154,6726** (64,6447)	-78,1182*** (29,8729)
Observações	17.765	17.765	17.765	17.765	18.088	17.442	17.800	17.896	18.052	18.076
R-quadrado	0,6363	0,1373	0,1228	0,0674	0,2180	0,0848	0,4093	0,4421	0,6650	0,6534
Número de municípios	323	323	323	323	323	323	321	323	323	323
50%										
Lag (t-3)	-14,3149** (6,7297)	2,6180* (1,4707)	-0,9603 (0,8388)	3,5783** (1,6297)	-14.090,3038 (31.229,1052)	-0,0345* (0,0208)	-16,1454 (84,2550)	-6,6138 (5,2261)	-124,4691 (116,7441)	-63,7262 (54,9379)
Lag (t-2)	-13,6998* (7,3954)	0,6864 (1,2605)	-0,8701 (0,8446)	1,5565 (1,7739)	17.863,3992 (39.783,3284)	-0,0381* (0,0197)	-10,1260 (75,0302)	-3,8625 (5,6827)	-197,7686 (123,6179)	-106,0973* (61,4732)
Lag (t-1)	-13,6558* (7,3954)	0,1161 (1,2605)	-0,8718 (0,8446)	0,9879 (1,7739)	37.227,5694 (39.783,3284)	-0,0366* (0,0197)	43,2933 (75,0302)	-11,7664 (5,6827)	-204,0944 (123,6179)	-114,8041 (61,4732)

Tabela 4. Leads and Lags (continuação)

VARIÁVEIS	(1) Estoque	(2) Admissões	(3) Desligamentos	(4) Saldo	(5) ICMS	(6) Leptospirose	(7) Visitas	(8) Odontológicos	(9) Procedimentos	(10) Atendimentos
	(7,7104)	(1,1416)	(1,2907)	(0,9948)	(39.190,6209)	(0,0202)	(71,5832)	(7,8704)	(134,4348)	(71,4254)
Tratamento	-23,8180***	-7,4744***	1,7416	-9,2160***	-207.048,5684*	0,2499	-80,7141	-31,3430**	-431,1591***	-288,1297***
	(8,4644)	(1,5922)	(2,1565)	(2,9322)	(122.051,7416)	(0,2166)	(116,3286)	(14,5108)	(111,4563)	(59,2033)
Lead (t+1)	-30,7180***	-3,6445**	2,3067	-5,9512***	-135.404,7883*	-0,0386*	-112,7241	-16,4572**	-271,3771**	-178,6326***
	(9,5214)	(1,4252)	(2,1618)	(1,7077)	(77.877,7080)	(0,0213)	(123,4807)	(6,6020)	(123,5674)	(61,1429)
Lead (t+2)	-32,2011***	-0,7921	-0,2601	-0,5320	-169.637,0591*		-55,0899	-15,0851*	-223,6712*	-127,4625**
	(9,1809)	(0,7532)	(1,9595)	(1,3643)	(96.842,3119)		(113,9719)	(8,3044)	(120,5942)	(53,5647)
Lead (t+3)					58.556,5423		22,5362	-11,0341***	-198,3714	-109,7059**
					(82.946,9526)		(82,2894)	(3,9743)	(129,1894)	(55,4412)
Observações	17.380	17.380	17.380	17.380	17.696	17.064	17.408	17.528	17.660	17.684
R-quadrado	0,6358	0,1349	0,1215	0,0665	0,2249	0,0638	0,4129	0,4425	0,6651	0,6540
Número de municípios	316	316	316	316	316	316	314	316	316	316
Efeito fixo de municípios	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Efeito fixo de tempo	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Tenência específica de município	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fontes: Elaboração dos autores com dados do Caged, Sefaz/RS, Sinan, Sisab.

Notas:

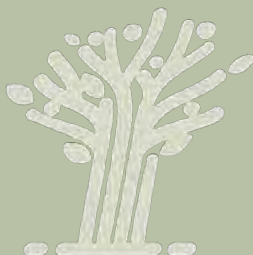
- Todas as variáveis dependentes estão ajustadas por mil habitantes.
- Os erros-padrão foram calculados de forma a considerar semelhanças entre os municípios (cluster), garantindo mais precisão nas estimativas.
- Os símbolos ***($p < 0,01$), **($p < 0,05$) e *($p < 0,1$) indicam diferentes graus de confiança nos resultados estatísticos, sendo o nível *** o mais rigoroso e o nível * o menos exigente.





Protocolo de gestão dos territórios sanitários temporários integrado (PTSTI) para resiliência do sistema de saúde nos desastres

ABNER W. Q. FREITAS
ANA MARIANE MARQUES BARROSO
LORENNIA MARIA DE OLIVEIRA BARBOSA
LUCIA CAMPOS PELLANDA



RESUMO

As inundações de 2024 no Rio Grande do Sul expuseram falhas críticas no sistema de saúde, como interrupções de serviços, superlotação de abrigos e escassez de insumos, revelando a falta de integração e governança interinstitucional. A resposta emergencial demonstrou a necessidade de um modelo que antecipe riscos, minimize impactos e promova ações coordenadas.

O Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (PTSTI) é proposto como solução, com Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S), integração operacional entre abrigos e hospitais de campanha, descentralização de estoques estratégicos e protocolos padronizados.

A análise da resposta ao desastre destacou fragmentação e comunicação ineficaz, aumentando custos e atrasos.

O PTSTI busca superar lacunas no sistema atual, como falta de capacitação contínua, infraestrutura de comunicação e planos de contingência. Propõe investimentos em treinamento, unificação de sistemas de informação e governança colaborativa, envolvendo diferentes níveis de gestão.



Lucia Campos Pellanda

Voluntários, em Porto Alegre, recebendo doações da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Rio Grande do Norte.

1. Introdução

A segurança e a resiliência do sistema de saúde desempenham um papel estratégico na proteção da saúde pública durante os desastres. Além de fornecer cuidados de saúde de qualidade, o sistema precisa garantir a continuidade de seus serviços, mesmo em condições adversas, assegurando um ambiente seguro e funcional. Para isso, a resiliência do sistema de saúde é fundamental, pois envolve, segundo Zhong, Clark, et al. (2014) a capacidade de prever, resistir, adaptar-se e recuperar-se de eventos adversos. Nesse sentido, conforme ressaltam Saba, Cardoso e Navarro (2012),

um sistema de saúde resiliente não se limita à qualidade do atendimento prestado, mas também considera a segurança ambiental e a capacidade de resposta a riscos externos.

Diferente da perspectiva centrada exclusivamente na estrutura e nos processos, a resiliência do sistema de saúde abrange uma rede interconectada de serviços, recursos humanos, suprimentos e infraestruturas que operam em diferentes níveis de atenção à saúde. Essa abordagem mais integrada permite uma resposta mais robusta e eficaz às demandas geradas por desastres, uma vez que promove a continuidade do cuidado em diversos pontos

do sistema, indo além do ambiente hospitalar. Estudos recentes destacam que a resiliência em saúde pública envolve a capacidade de adaptação às demandas ou eventos adversos, ajustando o funcionamento do sistema para manter a qualidade da assistência, mesmo sob estresse (Cardoso; Oliveira, 2020).

No Brasil, a importância da resiliência do sistema de saúde se evidencia na recorrente exposição a desastres, como inundações e deslizamentos de terra. Esses eventos adversos afetam não apenas a estrutura física dos hospitais, mas também os fluxos logísticos, o acesso a serviços essenciais e a capacidade de resposta de unidades básicas de saúde, centros de emergência e demais pontos da rede assistencial. A sobrecarga dos profissionais de saúde e as rupturas no abastecimento de insumos impactam diretamente a funcionalidade do sistema de saúde como um todo. Nesse contexto, a construção de um sistema de saúde resiliente torna-se uma estratégia essencial para mitigar riscos, reduzir vulnerabilidades e proteger a população afetada. Segundo Georgieva, Kostadinov e Semerdjieva (2022), sistemas de saúde resilientes são aqueles que conseguem absorver impactos, continuar operando e fornecer serviços essenciais em situações críticas.

A relevância do tema está atrelada à capacidade do sistema de saúde de manter sua operacionalidade durante e após desastres, reduzindo os impactos sobre as populações vulneráveis e mitigando os riscos à segurança pública. Trevisan e Witt (2019) ressaltam que a preparação para eventos de múltiplas vítimas requer planejamento, treinamento e simulação de resposta a desastres, o que fortalece a capacidade de resposta rápida e eficaz em toda a rede de saúde. Além disso, Khalil *et al.* (2022) destacam que a resiliência não depende apenas da proteção estrutural das edificações hospitalares, mas também da garantia de



Lucia Campos Pellanda

Equipes de resgate e acolhimento no Viaduto José Eduardo Utzig, Porto Alegre.

funcionamento das linhas vitais (eletricidade, água, gases medicinais) e da continuidade dos serviços assistenciais, incluindo unidades de atenção primária e centros de emergência.

Este documento se debruça sobre o caso das inundações ocorridas no Rio Grande do Sul, em maio de 2024, com foco no impacto dessas inundações sobre a resiliência do sistema de saúde no estado. O estudo abrange tanto áreas urbanas quanto rurais afetadas diretamente pelo desastre e analisa os esforços de resposta emergencial e recuperação empreendidos nos três níveis de gestão (municipal, estadual e federal). Nesse cenário, os grupos mais impactados incluem os profissionais de saúde, que enfrentaram desafios operacionais e riscos à segurança; os pacientes com necessidades contínuas de assistência, especialmente aqueles que dependem de vacinas e medicamentos; e as comunidades vulneráveis a

doenças infecciosas, como leptospirose e síndrome respiratória aguda grave, agravadas pela perda de insumos e pelo desabastecimento de suprimentos essenciais.

Ao consolidar as lições aprendidas e as evidências disponíveis, este policy paper visa subsidiar gestores e autoridades no fortalecimento das estratégias de resiliência do sistema de saúde. O intuito é apoiar a formulação de políticas públicas eficazes, promover a adoção de práticas de resiliência no planejamento do setor de saúde e aumentar a capacidade de resposta e recuperação do sistema de saúde como um todo. Mais do que um diagnóstico, este documento apresenta recomendações práticas para que a rede de saúde esteja mais preparada e apta a enfrentar futuros desastres.

2. Métodos

A metodologia adotada neste estudo foi concebida de forma a proporcionar uma análise abrangente e aprofundada sobre a resiliência do sistema de saúde em desastres, com foco nas inundações ocorridas no Rio Grande do Sul em 2024. O estudo combinou duas abordagens metodológicas principais: a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e a Análise de Conteúdo. Ambas foram realizadas de maneira integrada, com o objetivo de identificar evidências teóricas e práticas que subsidiem a formulação de políticas públicas voltadas à preparação e resposta do sistema de saúde.

A **Revisão Sistemática de Literatura (RSL)** foi elaborada com cinco etapas fundamentais: identificação, avaliação, elegibilidade, inclusão e análise. Inicialmente, foram definidos critérios de inclusão e exclusão, sendo elegíveis os que abordaram a resiliência hospitalar em contextos de desastres e trouxeram informações sobre estratégias de preparação, resposta e recuperação – sendo excluídos os estudos com métodos inadequados, publicações duplicadas

ou que não abordassem o tema específico da resiliência hospitalar. As bases de dados utilizadas – PubMed, Scopus e Web of Science – foram selecionadas por sua relevância na área da saúde e desastres, permitindo uma ampla cobertura da literatura disponível.

Na fase de busca, foram utilizados termos como “disaster” OR “disasters” OR “desastre” OR “desastres” AND “hospital resilience” OR “hospital resiliente”. O processo resultou na identificação de 97 artigos, sendo 17 oriundos da PubMed, 35 da Web of Science e 45 da Scopus. Após a remoção de duplicatas, restaram 53 artigos, e a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão resultou na seleção de 34 artigos. Durante a etapa de análise completa dos textos, foram excluídos três artigos que não apresentavam relevância direta ao tema, como relatórios setoriais com foco distinto da resiliência do sistema de saúde. Dessa forma, 31 estudos compuseram o corpus final da revisão.

A análise dos artigos foi realizada com o suporte de um formulário criado para registrar informações essenciais, como os conceitos de resiliência abordados, estratégias de adaptação e os principais desafios enfrentados pelos hospitais durante desastres. Os dados extraídos foram sistematizados em categorias que refletem os principais aspectos da resiliência hospitalar: definição do conceito, medidas de preparação e adaptação, desafios e obstáculos enfrentados, e a inter-relação com o sistema de saúde como um todo.

Além da RSL, foi conduzida uma **Análise de Conteúdo** para explorar os impactos reais das inundações no Rio Grande do Sul a partir de reportagens e publicações jornalísticas. A análise seguiu as etapas propostas por Bardin (1977), sendo composta pela organização prévia, codificação, categorização, análise, interpretação e validação dos resultados. O corpus foi constituído por reportagens de veículos de comunicação nacionais e locais,



Rafa Neddermeyer/Agência Brasil

Hospital de Campanha da Força Nacional do SUS montado em abrigo na cidade de Canoas.

priorizando as provenientes de instituições governamentais oficiais, publicadas durante o mês de maio de 2024, com foco nos impactos das inundações na saúde pública e nas respostas adotadas. As reportagens foram digitalizadas e organizadas em uma plataforma colaborativa para facilitar a análise qualitativa.

Durante a fase de codificação, os trechos das reportagens foram rotulados com base em unidades de análise, como frases e parágrafos que abordassem temas relacionados à saúde em desastres, como “interrupção de serviços de saúde”, “deslocamento de pacientes”, “ações de emergência governamentais” e “impactos das inundações nas condições sanitárias”. Esses códigos foram organizados em categorias mais amplas, como “Danos à Infraestrutura de Saúde” (referentes a

hospitais e postos de saúde afetados), “Respostas Imediatas em Saúde” (envolvendo evacuação de pacientes, instalação de hospitais de campanha e distribuição de medicamentos), e “Consequências Socioambientais” (como aumento de casos de doenças infecciosas e risco de surtos devido à contaminação hídrica). A análise buscou identificar padrões críticos, evidenciando a sobrecarga dos serviços de saúde, a escassez de insumos médicos e a dificuldade de coordenação entre unidades hospitalares em meio ao desastre.

A fase de validação consistiu na releitura dos dados e na revisão das categorias por um especialista da área de saúde e desastres, garantindo a consistência e a precisão das conclusões. Os resultados foram sintetizados em um diagrama cronológico que permite a visualização das re-

lações entre os impactos diretos, as respostas emergenciais e os desafios enfrentados. Essa etapa foi fundamental para relacionar os dados empíricos às categorias teóricas definidas na revisão sistemática, permitindo uma triangulação robusta das evidências.

A combinação dessas duas abordagens metodológicas proporcionou uma visão integrada e detalhada sobre a resiliência hospitalar em desastres. Enquanto a RSL ofereceu uma base teórica sólida e atualizada, a Análise de Conteúdo revelou os desafios operacionais enfrentados em situações reais, como as inundações de 2024. Essa articulação permitiu identificar lacunas e propor soluções mais eficazes.

3. Revisão sistemática de literatura

Foram incluídos na análise 31 artigos, de 2013 a 2023, sendo um 2013, dois 2014, um 2015, dois 2016, quatro 2017, três 2018, um 2019, três 2020, dois 2021, nove 2022 e três 2023. Os desastres biológicos, em especial, as epidemias, a partir de 2020 surgem nas publicações sobre sistemas de saúde resilientes, tendo um relevante crescimento nos anos seguintes. Este desastre recorda uma dimensão da resiliência, que é a capacidade de expansão dos serviços numa progressão geométrica enquanto os recursos se expandem numa progressão aritmética.

Os artigos analisados trouxeram sobre os sistemas de saúde resilientes nos desastres sua definição, as condições de preparação e adaptação, os desafios e obstáculos dessa preparação e como os hospitais nos desastres integram os sistemas de saúde.

Sobre definição

A resiliência do sistema de saúde é essencial para mitigar o impacto dos desastres e fortale-

cer a comunidade. Zhong *et al.* (2013) ressaltam que os hospitais devem oferecer serviços vitais em crises, com capacidade de adaptação e recuperação. Segundo Zhong *et al.* (2014), a resiliência hospitalar refere-se à habilidade de resistir, absorver impactos e manter funções críticas. Além disso, os autores reforçam que a resiliência do sistema de saúde envolve intensificar serviços essenciais durante crises e recuperar-se ou adaptar-se após o evento.

Maria Moitinho de Almeida *et al.* (2021) destacam a importância da flexibilidade adaptativa para serviços de emergência. Georgieva *et al.* (2022) enfatizam a capacidade de resposta rápida e eficaz, com restauração funcional em curto prazo. Ravaghi *et al.* (2023) propõem um modelo baseado em seis componentes interdependentes (espaço, recursos, equipe, sistemas, estratégias e serviços) e quatro capacidades: absorção, adaptação, transformação e aprendizado.

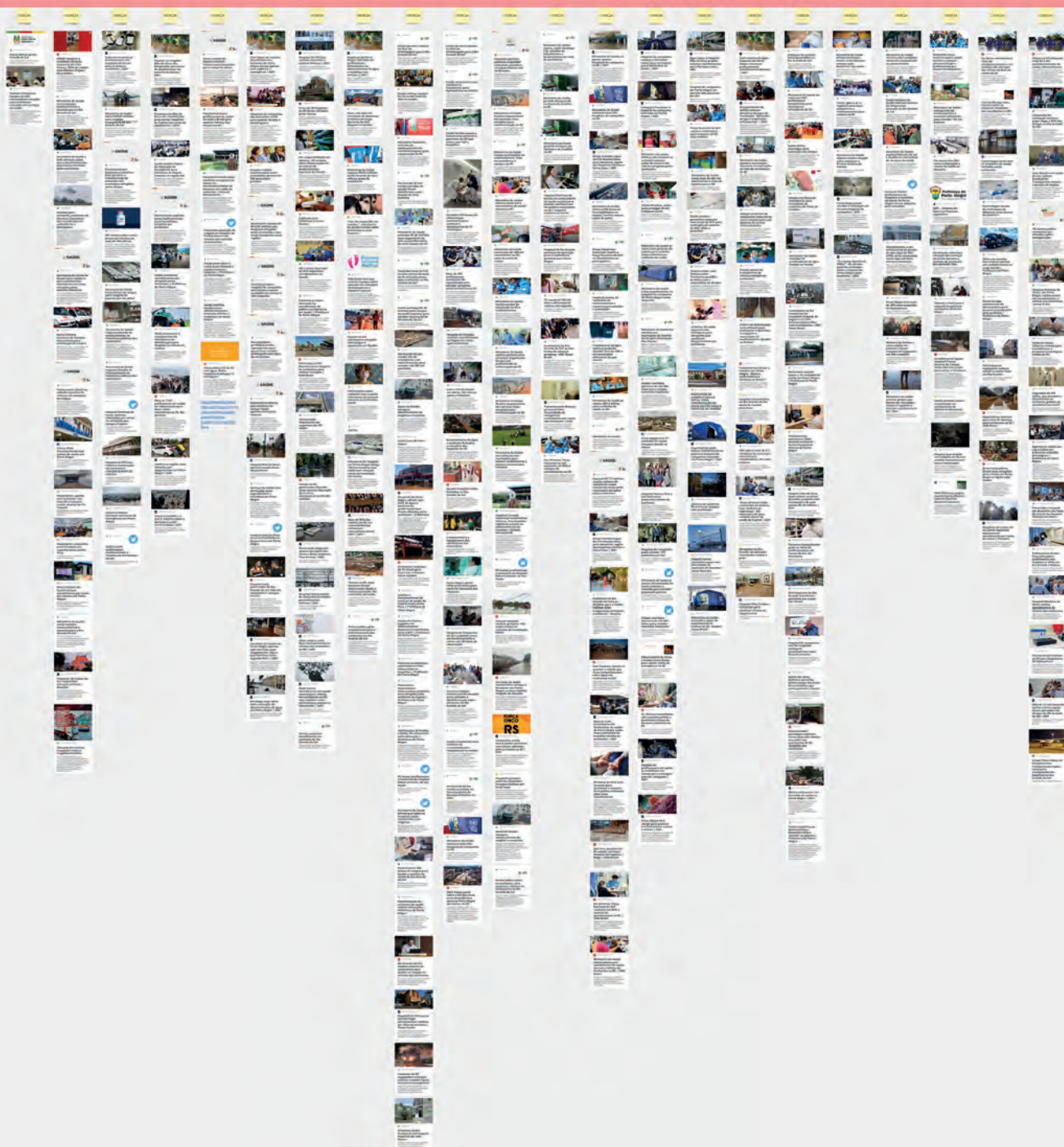
Sobre preparação e adaptação

A preparação e adaptação hospitalar envolvem a capacidade de antecipação e resposta a mudanças e interrupções, garantindo a continuidade dos serviços de saúde. Chand e Loosemore (2015) afirmam que essa resiliência inclui a adaptação a mudanças graduais e eventos catastróficos. Takim *et al.* (2016) destacam a análise das condições estruturais e funcionais por meio de indicadores específicos.

El Sayed *et al.* (2017) enfatizam a importância de planos abrangentes e redes de comunicação para fortalecer a resposta hospitalar. Moitinho de Almeida *et al.* (2020) ressaltam que a resiliência vai além da estrutura física, abrangendo a capacidade de manter cuidados críticos. Brambilla *et al.* (2021) apontam que a flexibilidade no planejamento das instalações é um desafio contínuo.

Imagem 1. Painel semântico com reportagens organizadas cronologicamente

MAIO / 2024



Sobre desafios e obstáculos

Os desafios para a resiliência hospitalar incluem a falta de preparação, funcionalidade inconsistente e interrupção de serviços vitais após desastres (Ghanaatpisheh *et al.*, 2019). Por outro lado, hospitais resilientes conseguem fornecer serviços essenciais e reduzir riscos de lesões (Fallah-Aliabadi *et al.*, 2020). Galbusera *et al.* (2022) reforçam o papel dos hospitais como centros de apoio durante emergências, enquanto Fallah-Aliabadi *et al.* (2021) defendem investimentos para reduzir vulnerabilidades aos choques. Ravaghi *et al.* (2022) destacam a importância de medidas sistemáticas para prevenção de infecções e manutenção de funções essenciais.

Sobre sistema de saúde

A resiliência do sistema de saúde é crucial para enfrentar crises, sendo definida como a capacidade de resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se de forma eficiente (Khalil *et al.*, 2022). Sun *et al.* (2023) destacam a importância da infraestrutura hospitalar em absorver choques e manter serviços essenciais. Susanti *et al.* (2023) reforçam que a resiliência implica responder eficazmente e recuperar-se ao estado pré-evento ou adaptar-se a um novo funcionamento.

4. Análise de conteúdo

A análise de conteúdo de Bardin (1972) foi adotada como metodologia para a categorização e interpretação dos dados coletados neste estudo, proporcionando uma análise qualitativa rigorosa e sistemática, conforme o painel semântico na imagem 1. Essa abordagem permitiu identificar as principais dimensões relacionadas à resiliência do sistema de saúde no atendimento à população durante desastres, facilitando a organização de categorias-chave e a extração de significados relevantes.

As respostas imediatas em saúde incluíram a evacuação de pacientes de unidades hospitalares inundadas e o transporte para cidades vizinhas, além da instalação de hospitais de campanha em áreas críticas. Também foi registrada a distribuição de medicamentos e insumos básicos em regiões isoladas, embora houvesse escassez de alguns itens essenciais, como equipamentos de proteção individual e remédios de uso contínuo.

Apesar das dificuldades, a presença de organizações não governamentais, como a Cruz Vermelha, foi mencionada como um fator essencial para a continuidade do suporte humanitário em áreas de difícil acesso. A mobilização da sociedade civil também foi ressaltada, com iniciativas de doação de alimentos, roupas e medicamentos, além do apoio de voluntários em diversas localidades.

Os resultados reforçam a necessidade de estratégias integradas de gestão de crises, como a criação de centros de comando e controle e a padronização de protocolos de resposta. A análise evidenciou que, para mitigar os impactos de desastres futuros, é imprescindível melhorar a comunicação interinstitucional, garantir a manutenção de estoques de insumos e fortalecer a capacidade de resposta local, especialmente em regiões vulneráveis. Os resultados detalhados dessa análise, incluindo as categorias, subcategorias e suas respectivas interpretações, estão disponíveis no repositório do site da pesquisa.

5. Análise de solução

Serão analisadas três alternativas para selecionar uma única estratégia mais adequada ao fortalecimento da resiliência do sistema de saúde: (1) Protocolo Integrado (PTSTI), que centraliza a gestão por meio de Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S), articulando



Lucia Campos Pellanda

Farmácia organizada em abrigo pelo curso de Farmácia da Fundação Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA).

abrigos e hospitais de campanha com diretrizes padronizadas; (2) Modelo Descentralizado (TSTD), que confere autonomia aos municípios para criar e operar TST com apoio técnico e recursos descentralizados; e (3) Protocolo Emergencial (PTSTE), ativado durante desastres, com hospitais de campanha móveis e uso de estruturas temporárias.

5.1. Soluções alternativas

A análise comparativa das alternativas considerará critérios como coordenação, custo-benefício e eficiência, a fim de selecionar a solução mais viável e eficaz para aplicação em contextos de desastres:

1. Implementação do Protocolo de TST Integrado (PTSTI):

- Descrição: Trata-se de um protocolo unificado que estabelece diretrizes de funcionamento para a instalação de Territórios Sanitários Temporários, articulando abrigos e hospitais de campanha em um modelo integrado de gestão. O PTSTI define as funções de cada unidade de saúde, os fluxos de pacientes e as responsabilidades dos gestores municipais, estaduais e federais.
- Estrutura: Inclui a criação de Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S) para a gestão integrada de todos os TST, com equipes técnicas capacitadas para supervisão,

comunicação direta com os hospitais e coordenação das ações de evacuação, triagem e atendimento à população.

- **Implementação:** Requer capacitação prévia de profissionais de saúde e gestores, bem como o mapeamento de possíveis locais para a instalação de TST em áreas de risco.

2. Modelo de TST Descentralizado (TSTD):

- **Descrição:** Nessa alternativa, cada município estabelece seu próprio protocolo de criação e gestão dos TST, com autonomia para definir a localização dos abrigos e dos hospitais de campanha.
- **Estrutura:** A responsabilidade de operação é distribuída para os municípios, que coordenam os esforços locais e têm maior autonomia na tomada de decisões, mas com apoio técnico e logístico do Governo Estadual e Federal.
- **Implementação:** Envolve a capacitação de equipes municipais e o fortalecimento das estruturas de saúde locais, com a disponibilização de recursos financeiros descentralizados para as prefeituras.

3. Protocolo de TST Emergencial (PTSTE):

- **Descrição:** Esse protocolo propõe a criação de TST apenas durante a ocorrência de desastres, sem uma estrutura prévia, sendo ativados de forma emergencial e adaptativa conforme a magnitude e localização do desastre.
- **Estrutura:** O modelo é baseado na mobilização emergencial de recursos de estados e municípios, utilizando hospitais de campanha de rápida mobilização, tendas de atendimento e o uso de espaços improvisados, como ginásios e escolas.
- **Implementação:** Exige um plano de ação padronizado para a rápida instalação de TST, mas não requer uma estrutura fixa prévia. A dependência de doações, voluntários e mobilização externa é maior nesse modelo.

5.2. Vantagens e desvantagens

Alternativa	Vantagens	Desvantagens
PTSTI (Protocolo Integrado)	- Resposta integrada e coordenada. - Melhoria no fluxo de atendimento e evacuação. - Redução de duplicidade de ações e esforços. - Comunicação centralizada e rápida entre hospitais, abrigos e equipes de resposta.	- Requer maior investimento inicial em capacitação e estruturação do C3S. - Pode apresentar resistência de gestores locais à centralização das ações. - Implementação gradual e mais lenta.
TSTD (Modelo Descentralizado)	- Autonomia dos municípios para responder localmente. - Agilidade na tomada de decisões locais. - Maior adaptabilidade às realidades locais.	- Desorganização em casos de múltiplas jurisdições afetadas. - Falta de padronização entre os municípios. - Dependência de recursos locais, o que pode sobrecarregar as prefeituras mais vulneráveis.
PTSTE (Protocolo Emergencial)	- Rápida ativação e mobilização de recursos. - Não requer investimentos prévios em infraestrutura permanente. - Mais flexível para lidar com eventos imprevisíveis.	- Alta dependência de doações e voluntariado. - Desorganização e atraso nas respostas iniciais. - Maior dificuldade em garantir a qualidade e continuidade dos serviços de saúde.

5.3. Custo-benefício

1. Protocolo de TST Integrado (PTSTI)

- **Custo:** Requer investimento inicial elevado, com custos relacionados à criação do Centro de Comando (C3S), aquisição de equipamentos de comunicação, treinamento de equipes de resposta e mapeamento de locais estratégicos para instalação dos TST.
- **Benefício:** Redução de custos operacionais durante o desastre, pois a centralização da gestão evita a duplicidade de ações e promove o uso racional de recursos. Além disso, a resposta integrada minimiza o impacto na saúde pública e reduz os custos de recuperação pós-desastre.

2. Modelo de TST Descentralizado (TSTD)

- **Custo:** Necessita de menos investimento inicial em comparação ao PTSTI, mas requer a descentralização de verbas para os municípios e o fortalecimento das estruturas locais de saúde.
- **Benefício:** Agilidade na resposta local e capacidade de adaptação às realidades de cada município. Porém, pode gerar sobrecarga financeira nos municípios, especialmente os de menor capacidade fiscal.

3. Protocolo de TST Emergencial (PTSTE)

- **Custo:** Menor custo inicial, mas os custos operacionais durante o desastre são muito elevados, devido à mobilização de recursos de forma emergencial e à dependência de apoio externo.
- **Benefício:** Capacidade de ativação rápida e adaptabilidade em desastres de maior magnitude. No entanto, o custo de reestabelecimento da rede de serviços é maior, e a interrupção de serviços de saúde pode gerar efeitos adversos de longo prazo.

A análise das alternativas revela que a criação de um Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) integrado é a solução mais eficiente para fortalecer a resiliência do sistema de saúde em desastres. O modelo de PTSTI se destaca por garantir uma resposta rápida, integrada e coordenada, evitando a duplicidade de esforços e melhorando a comunicação entre abrigos, hospitais de campanha e serviços de saúde locais.

Embora exija maior investimento inicial, o custo-benefício a médio e longo prazo é amplamente favorável. Assim, a adoção do Protocolo de TST Integrado (PTSTI) é recomendada como uma estratégia de política pública para gestores e formuladores de políticas no Brasil, especialmente em estados suscetíveis a desastres naturais.

6. Recomendação

A recomendação central do presente trabalho é a adoção e implementação do Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) Integrado (PTSTI), uma estratégia que visa coordenar e integrar a resposta de saúde em abrigos e hospitais de campanha durante desastres, ampliando o acesso ao atendimento, fortalecendo a articulação entre unidades de saúde e promovendo a maior eficiência na triagem de pacientes.

6.1. Proposta de ação

Com a criação de Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S), espera-se um aumento significativo na capacidade de atendimento emergencial e uma expressiva redução no tempo médio de evacuação hospitalar, proporcionando uma resposta mais ágil e segura. Além disso, a distribuição estratégica de TST em regiões críticas poderá diminuir consideravelmente o tempo necessário para que populações em áreas remotas acessem serviços essenciais de saúde.

A padronização de fluxos de atendimento e a implementação de um sistema de comunicação unificado prometem reduzir a duplicidade de esforços e deslocamentos desnecessários, resultando em um aumento relevante no número de pessoas assistidas em situações de crise. A centralização das decisões não apenas otimiza recursos e fortalece a capacidade de resposta, mas também amplia a continuidade do cuidado, garantindo maior resiliência do sistema de saúde e proteção para as populações vulneráveis.

6.2. Ações práticas

Para implementar o Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários integrado (PTSTI), recomenda-se a execução das seguintes ações práticas:

1. Criação de Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S)

● **Objetivo:** Implementar centros de controle regionais, responsáveis por monitorar e coordenar as ações de saúde durante desastres.

● **Ações:**

- Designar locais estratégicos para a instalação de C3S em áreas de risco.
- Estabelecer equipes multidisciplinares de saúde, logística, comunicação e segurança.
- Implantar tecnologias de monitoramento em tempo real (dashboards) para acompanhamento de fluxos de atendimento, ocupação de abrigos e estoques de insumos.

2. Capacitação e treinamento de equipes de saúde

● **Objetivo:** Preparar gestores, profissionais de

saúde e equipes de logística para atuar de forma coordenada nos TST.

● **Ações:**

- Realizar treinamentos anuais em evacuação, triagem, atendimento de urgência e suporte psicossocial.
- Criar simulações práticas de desastres para testar o tempo de resposta dos profissionais.
- Elaborar materiais didáticos e protocolos operacionais padronizados para serem utilizados por todas as equipes.

3. Desenvolvimento de protocolos de gestão de fluxos de pacientes

● **Objetivo:** Definir as regras de triagem, evacuação e fluxo de pacientes nos abrigos e hospitais de campanha.

Atendimentos no Hospital de Campanha da Força Nacional do SUS em Porto Alegre, em maio de 2024.



Vitor Moura/Ministério da Saúde

● **Ações:**

- Padronizar os critérios de prioridade de atendimento com base na gravidade dos casos.
- Criar sistemas de transferência de pacientes de hospitais inoperantes para outras unidades da rede.
- Estabelecer mecanismos de evacuação de áreas de risco, priorizando grupos vulneráveis (idosos, crianças e pessoas com doenças crônicas).

4. Fortalecimento de estoques estratégicos de insumos e equipamentos

- **Objetivo:** Assegurar a disponibilidade de insumos críticos para o funcionamento dos TST.

● **Ações:**

- Criar estoques descentralizados de medicamentos, EPIs e materiais de assistência básica em locais estratégicos.
- Manter o controle de validade dos produtos e realizar o reabastecimento periódico.
- Criar parcerias com o setor privado para mobilização de doações e apoio logístico em situações de emergência.

5. Implementação de sistemas de comunicação unificados

- **Objetivo:** Garantir a comunicação eficiente entre abrigos, hospitais de campanha, C3S e serviços de emergência (Samu, Defesa Civil, Corpo de Bombeiros).

● **Ações:**

- Criar canais de comunicação oficiais (números de emergência, aplicativos de alerta e plataformas de mensagens seguras).
- Integrar as informações de evacuação e assistência nos sistemas de gestão de saúde.
- Implementar sistemas de backup para evitar falhas de comunicação em situações críticas.

6. Estabelecimento de parcerias interinstitucionais

- **Objetivo:** Mobilizar recursos financeiros, logísticos e operacionais para o funcionamento dos TST.

● **Ações:**

- Firmar parcerias com ONGs, instituições acadêmicas, empresas de tecnologia e o setor privado.
- Desenvolver um plano de governança que assegure o compartilhamento de responsabilidades entre Estados, Municípios e o Governo Federal.

6.3. Justificativa

A recomendação de adotar o Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) Integrado (PTSTI) se baseia em três pilares fundamentais: **eficácia, eficiência e sustentabilidade**.

1. Eficácia: O PTSTI permite uma resposta mais rápida e coordenada, reduzindo o tempo de espera dos pacientes, melhorando a capacidade de triagem e permitindo evacuações seguras e ágeis. Isso garante a continuidade do atendimento à saúde e diminui o impacto nas populações vulneráveis.

2. Eficiência: A centralização das decisões em um Centro de Comando e Controle de Saúde (C3S) melhora o uso de recursos e evita a duplicidade de esforços, como a mobilização desnecessária de ambulâncias ou a alocação ineficiente de insumos. Isso permite uma economia de recursos e uma gestão mais racional dos estoques.

3. Sustentabilidade: A implementação de uma estrutura de C3S, combinada com estoques descentralizados e capacitação contínua das equipes, assegura a capacidade do sistema de saúde de enfrentar futuros desastres de forma menos onerosa e mais eficiente. Em vez de depender de soluções emergenciais e improvisadas, o sistema se prepara de forma antecipada, reduzindo os custos de resposta e recuperação.

6.4. Stakeholders

A implementação do Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) Integrado (PTSTI) requer a participação ativa de uma série de atores-chave, cada um desempenhando papéis específicos e indispensáveis para o sucesso da política pública:

1. Ministério da Saúde (MS)

- Papel: Fornecimento de recursos financeiros e diretrizes para a implementação do protocolo.
- Responsabilidades: Alocação de verbas, capacitação de equipes estaduais e monitoramento da execução dos TST.

2. Secretarias Estaduais de Saúde (SES)

- Papel: Implementação do C3S e supervisão da operação dos TST.
- Responsabilidades: Coordenação das equipes estaduais e regionais, execução de simulados e elaboração de planos regionais de emergência.

3. Secretarias Municipais de Saúde (SMS)

- Papel: Implementação dos abrigos e hospitais de campanha.
- Responsabilidades: Garantir o atendimento primário e a mobilização de recursos locais, em parceria com entidades privadas e ONGs.

4. Defesa Civil e Corpo de Bombeiros

- Papel: Atuação na evacuação de áreas de risco e apoio logístico aos TST.
- Responsabilidades: Articulação com o C3S, apoio nas operações de triagem, transporte de pacientes e evacuação de hospitais.

5. Instituições acadêmicas e centros de pesquisa

- Papel: Assessoria técnica, capacitação e avaliação dos protocolos operacionais.
- Responsabilidades: Desenvolver estratégias de resposta baseadas em evidências científicas e formar profissionais de saúde para atuar nos TST.

6. Setor privado e ONGs

- Papel: Parceria na oferta de equipamentos, insumos e serviços de apoio logístico.
- Responsabilidades: Apoio com logística de transporte, fornecimento de alimentos, EPIs e medicamentos, além de oferecer suporte psicológico aos afetados.

7. Comunidade local

- Papel: Participação ativa nas estratégias de resposta e prevenção.
- Responsabilidades: Colaborar com doações, apoio a voluntários e disseminação de informações precisas para prevenir a disseminação de fake news.

A implementação do Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) Integrado (PTSTI) é uma estratégia eficaz, eficiente e sustentável para responder a desastres no Brasil. Com ações práticas claras e bem definidas, e a participação ativa de atores-chave, o protocolo tem o potencial de transformar a capacidade do sistema de saúde de enfrentar desastres, salvar vidas e preservar a saúde pública em situações de emergência.

7. Implementação

A implementação do Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) Integrado (PTSTI) requer uma abordagem coordenada e progressiva, com projeções claras de benefícios para reforçar sua eficácia e justificar o investimento. Com a criação dos Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S), espera-se ampliar significativamente a capacidade de atendimento emergencial, contemplando um número maior de pacientes em áreas vulneráveis e reduzindo o tempo de ativação e triagem para um intervalo menor após o aviso de desastre.



Lucia Campos Pellanda

Equipes de resgate e acolhimento
no Viaduto José Eduardo Utzig em Porto Alegre.

7.1. Plano de ação

O protocolo também visa expandir a cobertura para atender uma parcela considerável da população nas primeiras horas de operação, minimizando os impactos nos desastres. O plano de ação será dividido em cinco fases principais: planejamento estratégico, desenvolvimento operacional, capacitação, implantação piloto e expansão. Durante essas etapas, serão mapeadas áreas de risco, estruturados estoques descentralizados de insumos e realizadas simulações para garantir a preparação das equipes.

Com metas como a redução do tempo de resposta e a garantia de continuidade de tratamento para a maioria dos casos, o PTSTI busca assegurar um fluxo eficiente de atendimento, evitando a sobrecarga das unidades. A implementação integrada e a mobilização coordenada de recursos fortalecem a capacidade de resposta do sistema de saúde, garantindo a continuidade dos serviços e a proteção das populações mais vulneráveis durante desastres.

O plano de ação envolve cinco fases principais que garantem a operacionalização eficiente e a sustentabilidade do protocolo:

1. Fase 1 - Planejamento estratégico (0-3 meses)

- **Objetivo:** Estruturar o modelo operacional do PTSTI, definir os papéis e responsabilidades dos stakeholders e aprovar o plano de financiamento.
- **Ações principais:**
 - Criação de um Comitê Gestor Nacional (CGN) para supervisionar a implementação.
 - Definição dos protocolos operacionais padrão (POP) para os Territórios Sanitários Temporários (TST).
 - Mapeamento dos locais estratégicos para abrigos, hospitais de campanha e Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S).

2. Fase 2 - Desenvolvimento operacional (3-6 meses)

- **Objetivo:** Estabelecer a estrutura e os mecanismos operacionais necessários para a execução do PTSTI.

● Ações principais:

- Implantação dos Centros de Comando e Controle de Saúde (C3S) nos estados prioritários.
- Estruturação dos estoques descentralizados de insumos estratégicos (medicamentos, EPIs, alimentos e equipamentos).
- Elaboração de materiais de capacitação e treinamento para gestores e equipes de saúde.

3. Fase 3 - Capacitação e treinamento (6-9 meses)

● **Objetivo:** Formar as equipes operacionais para a execução do PTSTI e realizar simulações de desastres.

● Ações principais:

- Treinamento de profissionais de saúde, gestores municipais e estaduais, Defesa Civil, bombeiros e equipes de assistência social.
- Realização de simulações práticas de desastres para teste do fluxo de evacuação, triagem e gestão dos TST.
- Avaliação de desempenho das equipes e ajustes nos POPs, se necessário.

4. Fase 4 - Implantação piloto (9-12 meses)

● **Objetivo:** Realizar a implementação do PTSTI em uma região piloto para validação do modelo.

● Ações principais:

- Instalação e operação de TST em uma área de risco previamente identificada.
- Avaliação de desempenho do C3S, dos fluxos de evacuação e da comunicação entre hospitais, abrigos e serviços de emergência.
- Identificação de lições aprendidas e ajustes operacionais.

5. Fase 5 - Expansão e consolidação (12-24 meses)

● **Objetivo:** Expandir a implementação do PTSTI para outras regiões do país e institucionalizar a política de forma permanente.

● Ações principais:

- Replicação do modelo para outras regiões de risco no Brasil.
- Avaliação de desempenho e certificação de conformidade dos TST e C3S.
- Formalização do PTSTI como política pública permanente.

7.2. Cronograma

Fase	Duração	Ações Principais
Fase 1 - Planejamento estratégico	0-3 meses	Criação do Comitê Gestor, definição de POPs e mapeamento de locais.
Fase 2 - Desenvolvimento operacional	3-6 meses	Instalação dos C3S, estruturação de estoques e preparação de materiais de capacitação.
Fase 3 - Capacitação e treinamento	6-9 meses	Capacitação de equipes, treinamento de gestores e simulações práticas.
Fase 4 - Implantação piloto	9-12 meses	Instalação de um TST em região piloto, operação e validação do modelo.
Fase 5 - Expansão e consolidação	12-24 meses	Expansão nacional, certificação e formalização como política pública.

7.3. Responsabilidades

Stakeholder	Papel	Responsabilidades
Ministério da Saúde (MS)	Financiamento, supervisão e articulação nacional.	Definição de POPs, alocação de recursos financeiros e apoio técnico aos estados e municípios.
Secretarias Estaduais de Saúde (SES)	Execução regional e coordenação dos C3S.	Coordenação do C3S, apoio aos municípios, capacitação e gestão de estoques estaduais.
Secretarias Municipais de Saúde (SMS)	Implementação local dos TST.	Operação de hospitais de campanha e abrigos, mobilização de equipes locais.
Defesa Civil e Corpo de Bombeiros	Apoio operacional e logístico.	Evacuação de áreas de risco, transporte de insumos e apoio à triagem.
Instituições acadêmicas	Apoio técnico e desenvolvimento de protocolos.	Avaliação de desempenho, capacitação e fornecimento de dados científicos.
Setor privado e ONGs	Apoio logístico e doações.	Fornecimento de alimentos, insumos e EPIs para os abrigos e hospitais de campanha.

7.4. Indicadores de monitoramento

Indicador	Descrição	Meta
Tempo de ativação do C3S	Tempo necessário para ativar o Centro de Comando.	< 3 horas após o aviso de desastre.
Taxa de ocupação dos TST	Percentual de ocupação dos TST durante o desastre.	Ocupação máxima de 85%.
Tempo de resposta à evacuação	Tempo entre a ordem de evacuação e a saída da área de risco.	< 6 horas para evacuação total.
Disponibilidade de insumos essenciais	Estoque de EPIs e medicamentos essenciais.	100% de disponibilidade.
Taxa de continuidade de tratamento	Percentual de pacientes com continuidade de tratamento garantida.	95% durante o desastre.
Capacitação de equipes	Percentual de equipes treinadas.	100% das equipes operacionais formadas.
Satisfação da população	Avaliação de satisfação dos usuários dos abrigos e hospitais de campanha.	Satisfação acima de 80%.

A implementação do Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (TST) Integrado (PTSTI) requer uma abordagem estruturada, com etapas bem definidas de planejamento, capacitação, desenvolvimento operacional, execução piloto e expansão. Com o apoio de órgãos públicos, organizações privadas e sociedade civil, o Brasil poderá aumentar a resiliência do sistema de saúde, garantir a continuidade do atendimento à população e mitigar os efeitos de desastres. O cronograma proposto, as responsabilidades dos stakeholders e os indicadores de desempenho oferecem uma base sólida para garantir a implementação bem-sucedida e a institucionalização do PTSTI como uma política pública nacional.

8. Conclusão

A resiliência do sistema de saúde no atendimento à população durante desastres é essencial para a preservação da vida, a continuidade dos serviços e a proteção das comunidades vulneráveis. As inundações ocorridas no Rio Grande do Sul em maio de 2024 evidenciaram que, embora existam diretrizes e protocolos para resposta a emergências, o contínuo aperfeiçoamento da aplicação prática dessas diretrizes é importante para garantir uma resposta plenamente integrada e eficaz. As dificuldades operacionais e logísticas enfrentadas indicam a necessidade de medidas mais robustas e coordenadas, capazes de suprir as lacunas identificadas.

O Protocolo de Gestão dos Territórios Sanitários Temporários (PTSTI) surge como uma proposta inovadora para aprimorar a articulação entre unidades de saúde, abrigos e hospitais de campanha, além de descentralizar estoques essenciais. Esse protocolo tem o potencial de evitar duplicidade de esforços e reduzir impactos adversos, desde que seja implementado com planejamento adequado e avaliações contínuas.

Portanto, a institucionalização do PTSTI como política pública permanente pode contribuir para a uma resposta mais ágil e eficiente. No entanto, é crucial monitorar sua implementação e adaptar as ações às necessidades locais para fortalecer, de forma contínua, a capacidade de resposta do sistema de saúde nos desastres, assegurando a proteção das populações mais vulneráveis e a mitigação de danos humanos e materiais.

Referências

- ACHOUR, N. *et al.* Hospital resilience to natural hazards: classification and performance of utilities. *Disaster Prevention and Management*, 23(1), 2014, p. 40-52. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/dpm-03-2013-0057>
- BRAMBILLA, A. *et al.* Flexibility during the covid-19 pandemic response: healthcare facility assessment tools for resilient evaluation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 2021, p. 11478. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph182111478>
- CARDOSO, R. B. da S.; OLIVEIRA, A. B. de. Hospitais seguros em desastres: demandas e tecnologias voltadas à redução de riscos. *Saúde em Debate*, 44(spe2), 2020, p. 84-97. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-11042020e206>
- CHAND, A. M.; LOOSEMORE, M. A socio-ecological analysis of hospital resilience to extreme weather events. *Construction Management and Economics*, 33(11-12), 2015, p. 907-920. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01446193.2016.1165856>
- CHAND, A. M.; LOOSEMORE, M. Hospital learning from extreme weather events: using causal loop diagrams. *Building Research & Information*, 44(8), 2016, p. 875-888. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1097805>
- CHAND, A. M.; LOOSEMORE, M. Hospital disaster management's understanding of built environment impacts on healthcare services during extreme weather events. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 23(3), 2016, p. 385-402. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ecam-05-2015-0082>
- CIMELLARO, G. P.; MALAVISI, M.; MAHIN, S. Using discrete event simulation models to evaluate resilience of an emergency department. *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2), 2016, p. 203-226. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1172373>
- CIMELLARO, G. P.; MALAVISI, M.; MAHIN, S. Factor analysis to evaluate hospital resilience. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4(1), 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0000952>
- CRISTIAN, B. Hospital resilience: a recent concept in disaster preparedness. *The Journal of Critical Care Medicine*, 4(3), 2018, p. 81-82. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/jccm-2018-0016>
- EL SAYED, M.; CHAMI, A. F.; HITTI, E. Developing a hospital disaster preparedness plan for mass casualty incidents: Lessons learned from the downtown Beirut bombing. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 12(3), 2017, p. 379-385. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/dmp.2017.83>
- FALLAH-ALIABADI, S. *et al.* Towards developing a model for the evaluation of hospital disaster resilience: a systematic review. *BMC Health Services Research*, 20(1), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12913-020-4915-2>
- FALLAH-ALIABADI, S. *et al.* Hospital disaster resilience: development of an assessment tool using expert panel and fuzzy analytical network process. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 13(5), 2021, p. 554-567. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ijdrbe-11-2020-0119>
- GALBUSERA, L. *et al.* Game-based training in critical infrastructure protection and resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, 2022, p. 103-109. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103109>
- GEORGIEVA, M.; KOSTADINOV, R.; SEMERDJIEVA, M. Disaster medical support plan as an element of the hospital disaster resilience. *Folia Medica*, 64(3), 2022, p. 507-512. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/folmed.64.e67644>
- GHANAATPISHEH, E.; KHANKEH, H.; MASOUMI, G. Challenges for hospital resilience in emergencies and disasters: a qualitative study in Iran. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.7860/jcdr/2019/41539.13120>
- G1 RS. *Cheias no RS: governador Eduardo Leite anuncia liberação de recurso emergencial de R\$ 200 milhões.* 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/07/cheias-no-rs-governador-eduardo-lei-te-detalha-situacao-do-estado.ghtml>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- ICIET/FIOCRUZ. Fiocruz divulga nota técnica sobre os impactos imediatos das inundações no RS. 2024. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/noticia/2024/05/fiocruz-divulga-nota-tecnica-sobre-os-impactos-imediatos-das-inundacoes-no-rs>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- KHALIL, M. *et al.* What is "hospital resilience"? A scoping review on conceptualization, operationalization, and evaluation. *Frontiers in Public Health*, 10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1009400>
- MARMO, R. *et al.* Lessons learnt for enhancing hospital resilience to pandemics: a qualitative analysis from Italy. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 81, 2022, p. 103265. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103265>
- MOHTADY ALI, H. *et al.* Investigating organizational learning and adaptations for improved disaster response towards "resilient hospitals": an integrative literature review. *Prehospital and Disaster Medicine*, 37(5), 2022, p. 665-673. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/s1049023x2200108x>
- MOITINHO DE ALMEIDA, M. "Recovering, not recovered" hospital disaster resilience: a case-study from the 2015 earthquake in Nepal. *Global Health Action*, 15(1), 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/16549716.2021.2013597>
- MOITINHO DE ALMEIDA, M. *et al.* Hospital resilience after the 2015 earthquake in Nepal: results from semi-structured interviews with hospital staff. *Frontiers in Public Health*, 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.602509>
- MOITINHO DE ALMEIDA, M. *et al.* Hospital resilience after the 2015 earthquake in Nepal: a qualitative study with hospital staff. *European Journal of Public Health*, 30 (Supplement_5), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa166.600>
- RAHMANI, M. *et al.* Resilience assessment of health-care facilities within urban context: learning from a non-profit

hospital in Tehran, Iran. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ijdrbe-11-2021-0151>

- RAVAGHI, H. *et al.* Role of hospitals in recovery from covid-19: reflections from hospital managers and frontliners in the Eastern Mediterranean Region on strengthening hospital resilience. *Frontiers in Public Health*, 10, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1073809>
- RAVAGHI, H. *et al.* Hospitals early challenges and interventions combatting covid-19 in the Eastern Mediterranean Region. *Plos One*, 17(6), e0268386, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268386>
- SABA, L. C. de P.; CARDOSO, T. A. de O.; NAVARRO, M. B. M. de A. Hospital seguro frente aos desastres: uma reflexão sobre biossegurança e arquitetura. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 31(2), 2012, p. 176-180. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1020-49892012000200013>
- SUN, P. *et al.* Critical public infrastructure underwater: the flood hazard profile of Florida hospitals. *Natural Hazards*, 117(1), 2023, p. 473-489. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05869-3>
- SUSANTI, Y. *et al.* Factors influencing hospital preparedness and resilience for emerging infectious diseases: a systematic review. *Journal of Public Health in Africa*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4081/jphia.2023.2555>
- TAKIM, R.; SAMSUDDIN, N. M.; NAWAWI, A. H. Assessing the content validity of hospital disaster resilience assessment instrument. *Jurnal Teknologi*, 78(5-2), 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8485>
- TARIVERDI, M. *et al.* Health care system disaster-resilience optimization given its reliance on interdependent critical lifelines. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(1), 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000465](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000465)
- TREVISAN, I.; WITT, R. R. Impacts and legacies of a disaster in a university hospital: a reference to the preparation. *Revista Mineira de Enfermagem*, 23, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1415-2762.20190018>
- ZHONG, S. *et al.* Validation of a framework for measuring hospital disaster resilience using factor analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(6), 2014, p. 6335-6353. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph110606335>
- ZHONG, S. *et al.* Development of key indicators of hospital resilience: a modified delphi study. *Journal of Health Services Research & Policy*, 20(2), 2014, p. 74-82. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1355819614561537>
- ZHONG, S. Development of hospital disaster resilience: conceptual framework and potential measurement. *Emergency Medicine Journal*, 31(11), 2013, p. 930-938. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/emmermed-2012-202282>
- ZHONG, S. *et al.* Disaster resilience in tertiary hospitals: a cross-sectional survey in Shandong Province, China. *BMC Health Services Research*, 14(1), 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-135>

Equipe de trabalho

Ana Mariane Marques Barroso
Acadêmica do curso de Medicina da UFCSPA

Lorena Maria de Oliveira Barbosa
Acadêmica do curso de Medicina da UFCSPA

Lucia Campos Pellanda
Especialista em Pediatria, doutora em Cardiologia
Professora titular do Departamento de Saúde Coletiva da UFCSPA

Abner Willian Quintino de Freitas
Mestre em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde pela UFCSPA
Pesquisador e empreendedor





Diagnóstico da aptidão agrícola das terras e fertilidade do solo em áreas agrícolas atingidas por desastres climáticos na Serra Gaúcha

GUSTAVO BRUNETTO, ALLAN AUGUSTO KOKKONEN,
ANA LUIZA LIMA MARQUES, LAURA SILVA DUNKER,
BRUNA TREVIZAN PAESE, JEAN MICHEL MOURA-BUENO,
DOUGLAS LUIZ GRANDO, LUCAS PERANZONI DEPONTI,
SAMUEL SCHEMMER, BRUNO EHLE DE SOUZA,
CAUAN GUERRA MARTINS, RIAN BRONDANI,
MARIA EDUARDA COSTA REIS ARAÚJO, ALEX BENETTI,
KATRIEL PETTERMANN BERTOLDO, LENON CERENTINI,
ANDRÉ SCHRÖDER BUSS



RESUMO

Eventos extremos climáticos causam a perda de solo e prejudicam cultivos. Áreas foram selecionadas na região da Serra Gaúcha do RS. Amostras de solo foram coletadas, preparadas, analisadas e os resultados interpretados. O evento climático extremo no RS causou perdas de solo, água e nutrientes. Isso prejudicou o plantio, crescimento e produção de culturas. Para recuperar os solos ou torná-los mais resilientes, sugere-se realizar a amostragem de solo, que será analisado.

Recomenda-se o uso de práticas e tecnologias que contribuem para a conservação de solos, como o uso de terraços e patamares, cultivo de plantas de cobertura e uso de calagem e adubações, inclusive com aplicações de resíduos orgânicos. A metodologia de amostragem do presente texto poderá ser utilizada como referência para monitorar danos em áreas, e os resultados obtidos poderão ajudar na tomada de decisões técnicas que podem contribuir para a recuperação de solos degradados por deslizamentos e enxurradas.



Queda de encosta em Bento Gonçalves.

1. Introdução

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios contemporâneos, com impactos profundos em ecossistemas, sociedade e economia global. Esse fenômeno é caracterizado pela intensificação de eventos climáticos extremos, como alterações nos regimes de precipitação, resultando em secas severas ou inundações. Isso ocorre em grande parte por causa do aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, resultante das atividades realizadas pelo ser humano. Conforme apontado no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças

Climáticas (IPCC, 2023), durante o intervalo de 2010 a 2019, os setores de energia, indústria, transporte e construção foram responsáveis por 79% das emissões de GEE. A agricultura, atividades florestais e outros usos da terra (Afolu, na sigla em inglês) contribuíram com uma parcela entre 13 e 21% do total.

Os últimos relatórios do IPCC destacam que a influência humana é a principal causa do aquecimento global, afetando a atmosfera, os oceanos e os continentes. A temperatura média da superfície global foi 1,1°C mais alta entre 2011 e 2020, em comparação ao período pré-industrial (1850–1900), com maiores

aumentos sobre a terra (1,59°C) do que sobre os oceanos (0,88°C). Esses efeitos são sentidos de maneira desigual em diferentes regiões do planeta. O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) apresenta estimativas regionalizadas que indicam mudanças expressivas até 2050, como aumento da temperatura, prolongamento de estações quentes, maior ocorrência de ondas de calor e redução de extremos de frio. Além disso, o relatório aponta que as áreas subtropicais da América do Sul devem registrar os maiores aumentos de temperatura, incluindo o Brasil, se tornando altamente vulnerável e exposto aos efeitos e riscos associados às mudanças climáticas.

Os impactos decorrentes das mudanças climáticas estão cada vez mais comprometendo a segurança alimentar, afetando a saúde humana e a economia. De acordo com uma análise divulgada em 2023 pela Confederação Nacional de Municípios (CNM), cerca de 93% das cidades brasileiras, correspondendo a mais de cinco mil municípios, enfrentaram desastres hidrometeorológicos na última década. Esses eventos, que incluem tempestades, enxurradas, inundações e deslizamentos de terra, resultaram na declaração de situações de emergência ou estados de calamidade pública. O levantamento da CNM apontou que, entre 2013 e 2022, mais de 2,2 milhões de residências foram danificadas no território nacional, afetando diretamente a vida de mais de 4,2 milhões de pessoas.

Eventos climáticos extremos têm causado perdas significativas ao longo das últimas décadas. No setor agropecuário global, esses eventos geraram prejuízos estimados em US\$ 3,8 trilhões entre 1991 e 2021, segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2023). No Brasil, a intensificação de eventos extremos tem gerado consequências devastadoras, como

enchentes, secas e deslizamentos de terra. Um exemplo é a seca ocorrida na região Sul entre 2019 e 2020, que acarretou prejuízos de R\$ 13,4 bilhões na agricultura, 1,9 bilhão na pecuária e R\$ 25,1 milhões no abastecimento de água (CNM, 2023).

No estado do Rio Grande do Sul (RS), a combinação de topografia acidentada, em algumas regiões, e padrões climáticos instáveis tornam a região altamente suscetível a desastres naturais causados por chuvas intensas, se destacando como uma das manifestações mais destrutivas das mudanças climáticas recentes. O relevo acidentado, caracterizado por encostas íngremes (Figura 1), favorece o escoamento superficial da água durante precipitações intensas, direcionando-a para as drenagens naturais. Esses sistemas hídricos são adaptados para conduzir os fluxos de água durante os períodos chuvosos normais. Porém, quando ocorrem eventos extremos, os sistemas hídricos são sobrecarregados, ultrapassando sua capacidade de retenção e drenagem, que resultam em escoamento superficial e que podem evoluir para deslizamento de terra em encostas e inundações em áreas próximas ao leito dos rios.



Imagem fornecida pelo autor

Figura 1. Foto ilustrando o relevo acidentado no Vale do Rio das Antas, no Rio Grande do Sul (RS). Fonte: os autores (2024).

Esses processos são amplificados pelas características dos tipos de solos presentes em áreas de relevo acidentado, como Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Cambissolos (Figura 2). Por serem solos de baixa profundidade, limitam o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e possuem reduzida capacidade de armazenamento de água. Quando esses solos são submetidos a chuvas intensas, especialmente aqueles de menor profundidade e em contato direto com substratos (rochas) pouco permeáveis (Figura 2A), eles saturam-se rapidamente, adquirindo um comportamento fluido que facilita o deslizamento por gravidade.

Essa dinâmica pode resultar no deslizamento de encostas em regiões de relevo acidentado (Figura 1), que, dependendo da magnitude do evento, podem gerar desastres significativos, causando perdas agrícolas, danos materiais, desabrigados e, tragicamente, perdas de

vidas. Além disso, a interação entre o tipo de solo e o substrato rochoso nas áreas de encosta agrava os impactos desses eventos. Solos pouco profundos, sobre rochas de baixa permeabilidade, atingem rapidamente a saturação durante chuvas intensas, desencadeando deslizamentos e comprometendo a estabilidade do terreno. A presença de rochas fragmentadas e saprólitos (rochas em processo de decomposição química e física, chamado de intemperização) auxilia a infiltração de água, que reduz encharcamento, bem como permite a penetração de raízes de árvores; ambos esses fatores diminuem a susceptibilidade a deslizamentos (Figura 3). Em locais com fraturamento insuficiente das rochas, a infiltração de água é limitada, o que agrava o encharcamento e a suscetibilidade a desastres (Figura 3).

As chuvas intensas ocorridas em abril e maio de 2024, no estado do RS, exemplificam esses

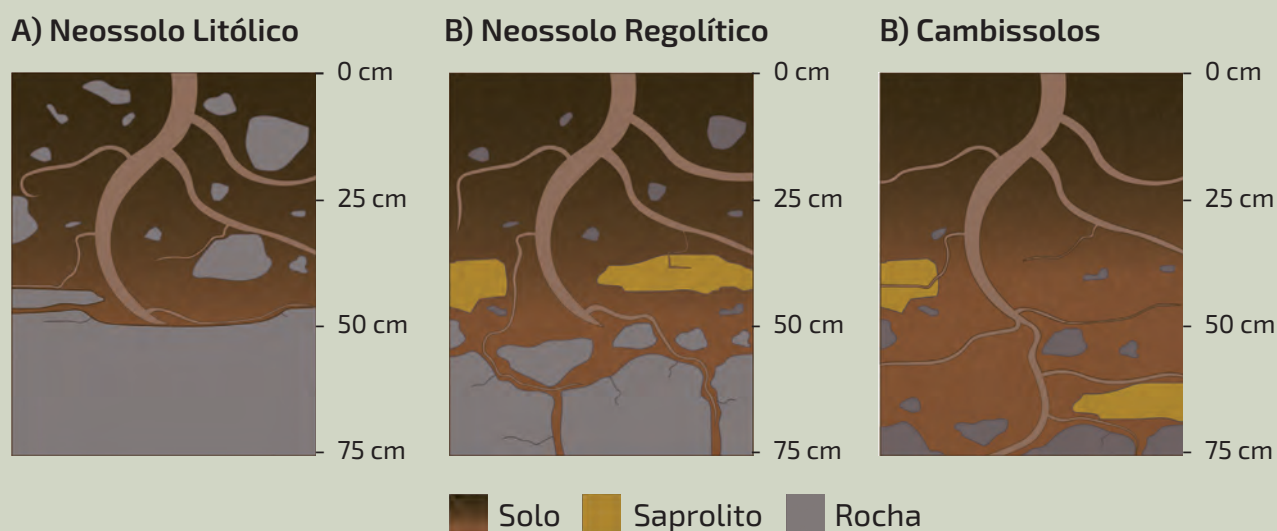
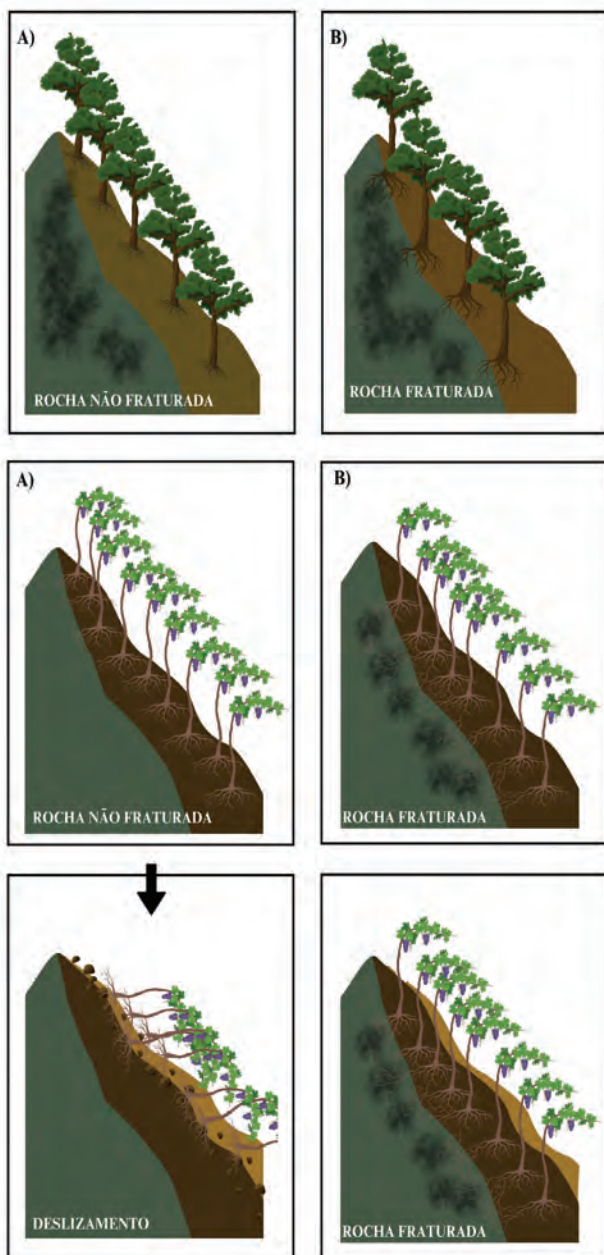


Figura 2. Classes de solo presentes em encostas do Vale do Rio das Antas: Neossolo Litólico (A), Neossolo Regolítico (B) e Cambissolos (B). Solos estão preenchidos com tons de marrom, saprólitos (pedras podres, em decomposição) com amarelo e rochas com cinza. Fonte: os autores (2024).



desafios, com precipitações pluviais que configuraram a maior catástrofe climática já registrada no estado. Segundo dados do Inmet (2024), diversas regiões, como os Vales, Serra, Campos de Cima da Serra e Litoral Norte, enfrentaram volumes de chuva superiores a 500 mm em 48 horas, enquanto a maior parte do estado registrou valores acima de 300 mm. Em cidades como Caxias do Sul, Santa Maria, Bom Jesus e Porto Alegre, esse foi o mês mais chuvoso desde o início dos registros meteorológicos, em 1961.

As intensas chuvas no RS, diretamente relacionadas às mudanças climáticas globais e ao aumento da temperatura média atmosférica, provocaram uma sobrecarga hídrica com consequências devastadoras, gerando movimentos de massa, destruição de vegetação e impactos significativos em múltiplos setores: na agricultura, com perdas expressivas em cultivos de grãos, na olericultura afetando 8.049 produtores de hortaliças; na pecuária, com danos severos a bovinos, suínos, aves e peixes; e na infraestrutura local, comprometendo sistemas produtivos e recursos naturais (Tazzo *et al.*, 2024). De acordo com associações agrícolas e órgãos estaduais, os prejuízos no setor agrícola foram massivos e chegaram a uma estimativa total de R\$ 4,4 bilhões. Isso evidencia a crescente vulnerabilidade dos ecossistemas

Figura 3. A) As raízes não penetram nas fraturas da rocha e do saprólito. A massa de solo com a água da chuva e a ação da gravidade provoca o movimento de massa, causando os deslizamentos. B) As raízes penetram no solo e nas fraturas da rocha e do saprólito, garantindo maior estabilidade do terreno e um menor movimento de massa. *Fonte: os autores (2024).*

a eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes e intensos.

Além disso, grandes prejuízos foram registrados em culturas como citros, banana, maçã e uva. Na produção de citros, especialmente na região dos vales, as chuvas coincidiram com a fase final de frutificação e colheita, resultando em alagamentos que ocasionaram senescência do tecido radicular, danos fisiológicos às plantas e queda dos frutos. Mais de oito mil produtores de frutíferas foram afetados, com destaque para as perdas em banana na região da Encosta da Serra e maçã nos Campos de Cima da Serra. Aproximadamente 500 hectares de vinhedos na Serra Gaúcha, incluindo municípios como Veranópolis, Cotiporã, Bento Gonçalves, Nova Roma do Sul, Caxias do Sul e Pinto Bandeira, foram danificados por deslizamentos de terra ou perda de infraestrutura. Além disso, esses eventos comprometeram a estabilidade do solo, a fertilidade e o equilíbrio hídrico, fatores essenciais para os cultivos, impactando diretamente a capacidade produtiva, a qualidade de safra e a economia local dos próximos anos (Tazzo *et al.*, 2024).

Diante deste contexto, o presente texto objetiva apresentar resultados de um diagnóstico da aptidão agrícola das terras e avaliação da fertilidade do solo, realizado em áreas de vinhedos e pomares, impactados por desastres climáticos, e propor recomendações de como recuperar essas áreas.

2. Metodologia

O RS é o maior produtor nacional de pêssego; de acordo com dados do IBGE de 2022, a produção foi de 137.552 toneladas, correspondendo a 65,8% da produção total do país. Além disso, a produção de uva no Brasil também está concentrada no RS, sendo o maior produtor. De

acordo com dados do IBGE 2022, a produção de uva foi de 734.982 toneladas, correspondendo a 51% da produção nacional. Os principais municípios produtores de pêssego e uvas no Sul se concentram na região da Serra Gaúcha.

A região da Serra Gaúcha se caracteriza por apresentar relevo de topografia acidentada e encostas íngremes. Nesses locais estão instalados a grande maioria dos vinhedos e pomares de produção agrícola. Essas áreas, apresentam os tipos de solos Neossolos e Cambissolos (mencionados na seção anterior). Essas áreas, quando expostas a fortes chuvas, rapidamente se saturaram por causa da baixa profundidade e permeabilidade das rochas, resultando em deslizamentos e instabilidade do terreno.

No final de abril e início de maio de 2024, a região da Serra Gaúcha sofreu uma catástrofe climática, que provocou vários deslizamentos em uma área de cerca de 262 quilômetros de comprimento por 70 quilômetros de largura, abrangendo um polígono com mais de 16 mil km² (Guimarães *et al.*, 2024).

Amostras de solo foram coletadas em locais específicos de deslizamentos nos municípios de Bento Gonçalves, Veranópolis e Pinto Bandeira, no Vale do Rio das Antas, na região da Serra Gaúcha (Figura 4). A região está situada em uma faixa de altitude que varia entre 100 e 800 m acima do nível do mar. O clima é classificado segundo o sistema Köppen-Geiger como subtropical úmida com verões quentes (Cfa) (Alvares *et al.*, 2013).

Foram selecionadas 10 áreas de pomares e vinhedos que foram atingidos por deslizamentos (Figura 4). Em cada ponto, foram coletadas amostras de solo utilizando um trado e pá de corte na camada diagnóstica de 0-20 cm, além de outros intervalos:

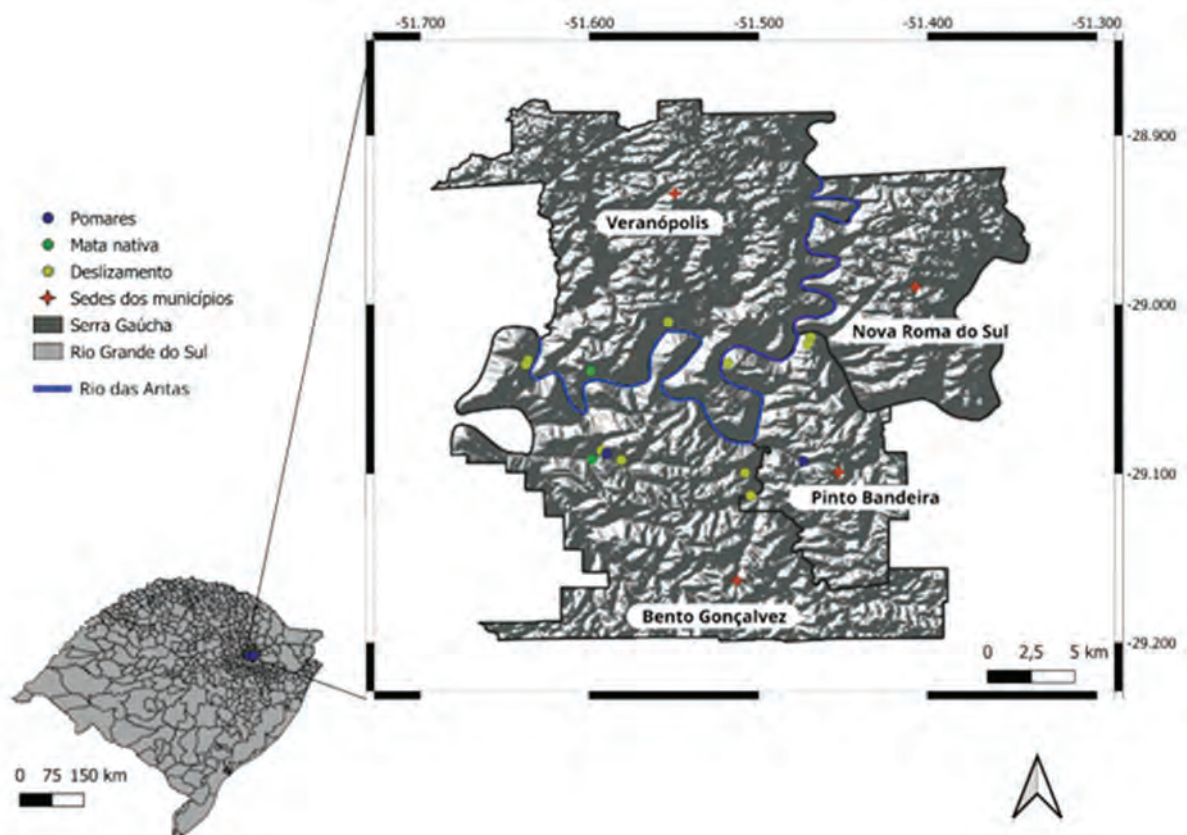


Figura 4. Mapa com pontos onde foram coletadas amostras de solo. Pontos vermelhos indicam áreas de deslizamento, pontos verdes indicam áreas de vinhedos e pontos amarelos indicam pontos de mata nativa. *Fonte: os autores (2024).*

0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm (Figura 5 – etapa 3). Foram coletadas 15 subamostras de solo distribuídas na área em cada profundidade, para formar a amostra composta representativa de cada local afetado. Em Bento Gonçalves seis áreas atingidas por deslizamento de terra foram amostradas; em Veranópolis uma área e em Pinto Bandeira três áreas. Adicionalmente, em três locais foram abertas trincheiras e coletadas amostras estratificadas de dez em dez centímetros até o contato com a rocha (Figura 5 – etapa 3). Com objetivo de comparar as áreas de vinhedos e pomares não atingidos com as atingidas por deslizamento, três solos de pomares e vinhedos não atingidos foram amostrados, sendo um em Pinto Bandeira e os outros dois

em Bento Gonçalves (Figura 4). Da mesma forma, amostras de solo foram coletadas em áreas de mata nativa, sem ação antrópica ou histórico de cultivo agrícola (Figura 4).

Em laboratório, as amostras foram secadas em estufa com circulação forçada de ar na temperatura de 40 a 45°C, moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) (Teixeira *et al.*, 2017). Na TFSA foi determinado: areia, silte e argila, pelo método da pipeta (Donagemma *et al.*, 2015; Teixeira *et al.*, 2017); pH em água (relação 1:1) (Tedesco *et al.*, 1995); teores disponíveis de fósforo (P) e potássio (K) (extraídos por Mehlich-1) (Tedesco *et al.*, 1995); teores disponíveis de Cobre (Cu), Zinco

(Zn), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) extraídos por EDTA (Chaignon *et al.*, 2003); teores trocáveis de Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ (Teixeira *et al.*, 2017) e matéria orgânica do solo por combustão úmida (Yeomans; Bremner, 1988).

Na solução extraída das amostras de solo foram quantificados por colorimetria os teores de P disponível, conforme Murphy; Riley (1962), o princípio da técnica consiste em tratar a solução contendo P extraído com um

reagente colorimétrico específico (molibdato de amônio). Esse reagente reage com o fósforo para formar um complexo colorido, o complexo de fosfomolibdênio azul. A intensidade da cor do complexo formado é proporcional à concentração de P na amostra. Essa cor é medida em Espectrofotômetro UV Visível (UV – 1600, Pro-Tools), que determina a absorbância da solução em um comprimento de onda específico. Os teores de K disponível foram quantificados em fotômetro de chama (DM-62, Digimed). Os valores de Al trocável foram obtidos por

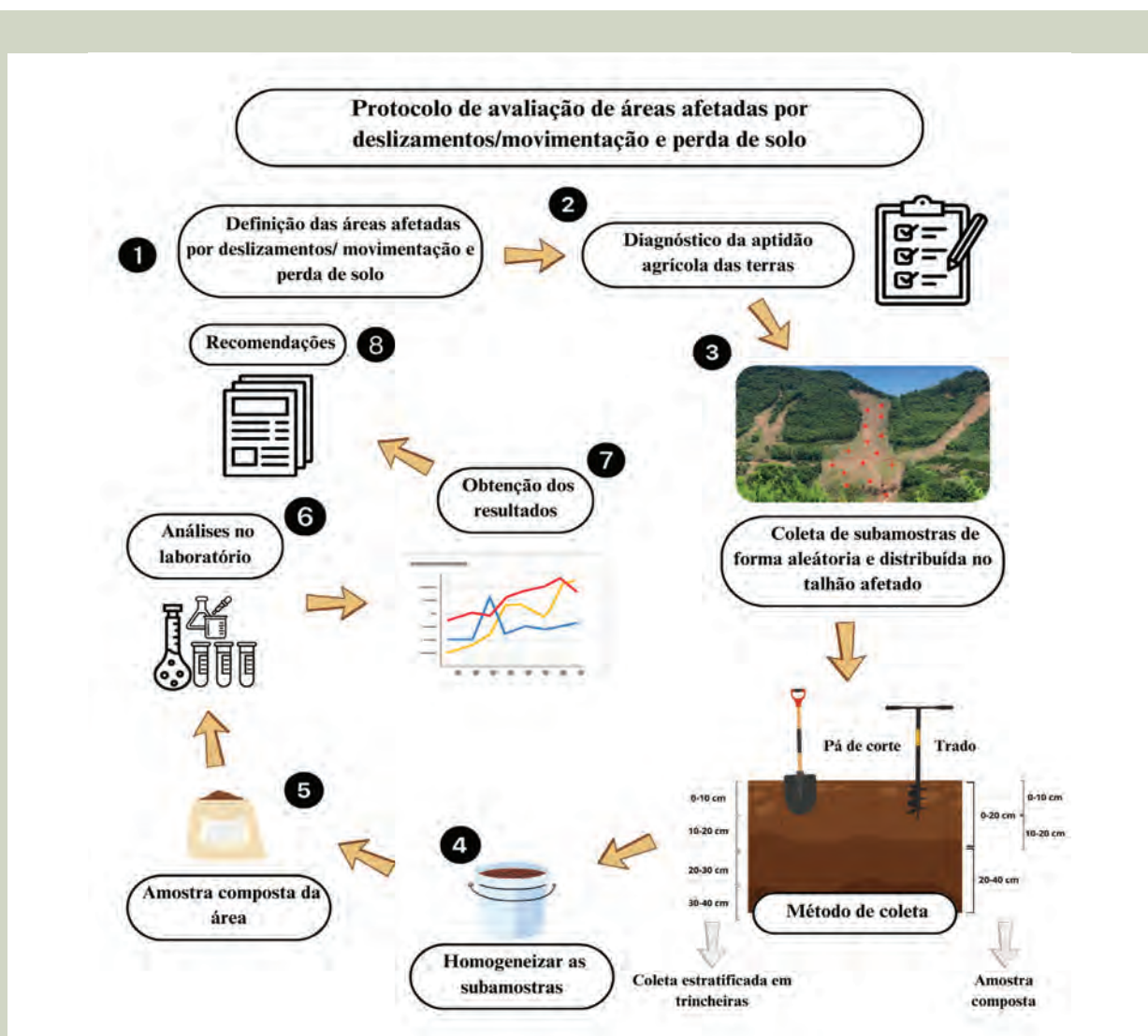


Figura 5. Representação esquemática da metodologia de amostragem e processamento de amostras de solo das áreas afetadas pelas chuvas. Fonte: os autores (2024).

titulação com NaOH 0,0125 mol L⁻¹. Os teores de Ca, Mg, Cu, Zn, Fe e Mn foram quantificados por espectroscopia de absorção atômica (AAnalyst 200, Perkinelmer). A partir dos dados obtidos foi calculada a acidez potencial (H+Al), saturação por bases (V%), saturação por Al (Al%) e capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_{efet.}) e potencial (CTC_{pH7,0}), conforme equações apresentadas pela CQFS-RS/SC (2016).

Adicionalmente, nas áreas de deslizamento de terra onde as amostras de solo foram coletadas, foi realizada a avaliação da aptidão de uso agrícola das terras de acordo com Ramalho Filho; Beek (1995) (Figura 5 – etapa 2). O método considera os seguintes fatores para avaliação: fertilidade do solo, deficiência e excesso de água, impedimento à mecanização, susceptibilidade à erosão hídrica. Esses fatores, por sua vez, estão relacionados com as seguintes características da terra: classe de solo, profundidade do solo, declividade do terreno, posição no terreno e presença de pedregosidade e rochosidade.

3. Diagnóstico da fertilidade do solo

As enxurradas, como as que ocorreram em abril/maio de 2024 na Serra Gaúcha, causam o arraste de partículas de solo, que são depositadas em diferentes locais. O solo pode se acumular em áreas de menor inclinação, formando depósitos que alteram a topografia local (Figura 6). Esse acúmulo pode resultar na formação de novos solos, mas também pode gerar problemas, como compactação e diminuição da permeabilidade. Além disso, há uma redução da fertilidade do solo, alteração no pH do solo, perda de biomassa vegetal, nutrientes e matéria orgânica.

A análise dos parâmetros químicos do solo revelam diferenças significativas entre as

áreas de deslizamento (área degradada), mata nativa ou regeneradas e pomares/vinhedos (Figura 7). A matéria orgânica do solo (MOS) é mais abundante na mata nativa (6,8%), seguida pelos pomares e vinhedos (3,9%), enquanto a área de deslizamento, apresenta os menores valores (0,6%), indicando degradação considerável do solo, pois o teor de MOS reduziu aproximadamente 10 vezes nas áreas de deslizamento comparado à mata nativa. Isso pode também ser visualizado nas trincheiras 1 e 2, em que os valores de MOS são menores na camada superficial do solo (0 a 20 cm), em comparação a camadas mais profundas, o que não é esperado. Em solos nativos ou antropizados, existe maior acúmulo de MOS nas camadas superficiais, devido à presença de plantas e, por conseguinte, de outros organismos. Possivelmente, dois fenômenos podem estar associados à perda de MOS nas áreas de deslizamento: a) a movimentação do solo causou maior mineralização da MOS por microrganismos, de maneira similar – porém mais intensificada – ao processo de revolvimento do solo (lavração); b) perda da MOS associada aos minerais do solo, principalmente ligado à fração argila, por escoamento superficial, isto é, as partículas de argila associadas à MOS foram perdidas dos sistemas junto com o alto volume de água.

Os pomares e vinhedos apresentam os maiores teores de P disponível (150 mg dm⁻³), resultado das práticas de adubação adotadas anteriormente. Já as áreas de deslizamento apresentaram níveis próximos a 51 mg dm⁻³ e a mata nativa os menores valores (12 mg dm⁻³). Nesse cenário, observa-se que uma grande quantidade de P foi transportado e redistribuído na paisagem, podendo ter atingido áreas mais baixas do terreno (áreas de sedimentação) ou chegado até os cursos de água. Na Figura 10a, podemos observar valores de P disponível inferiores a

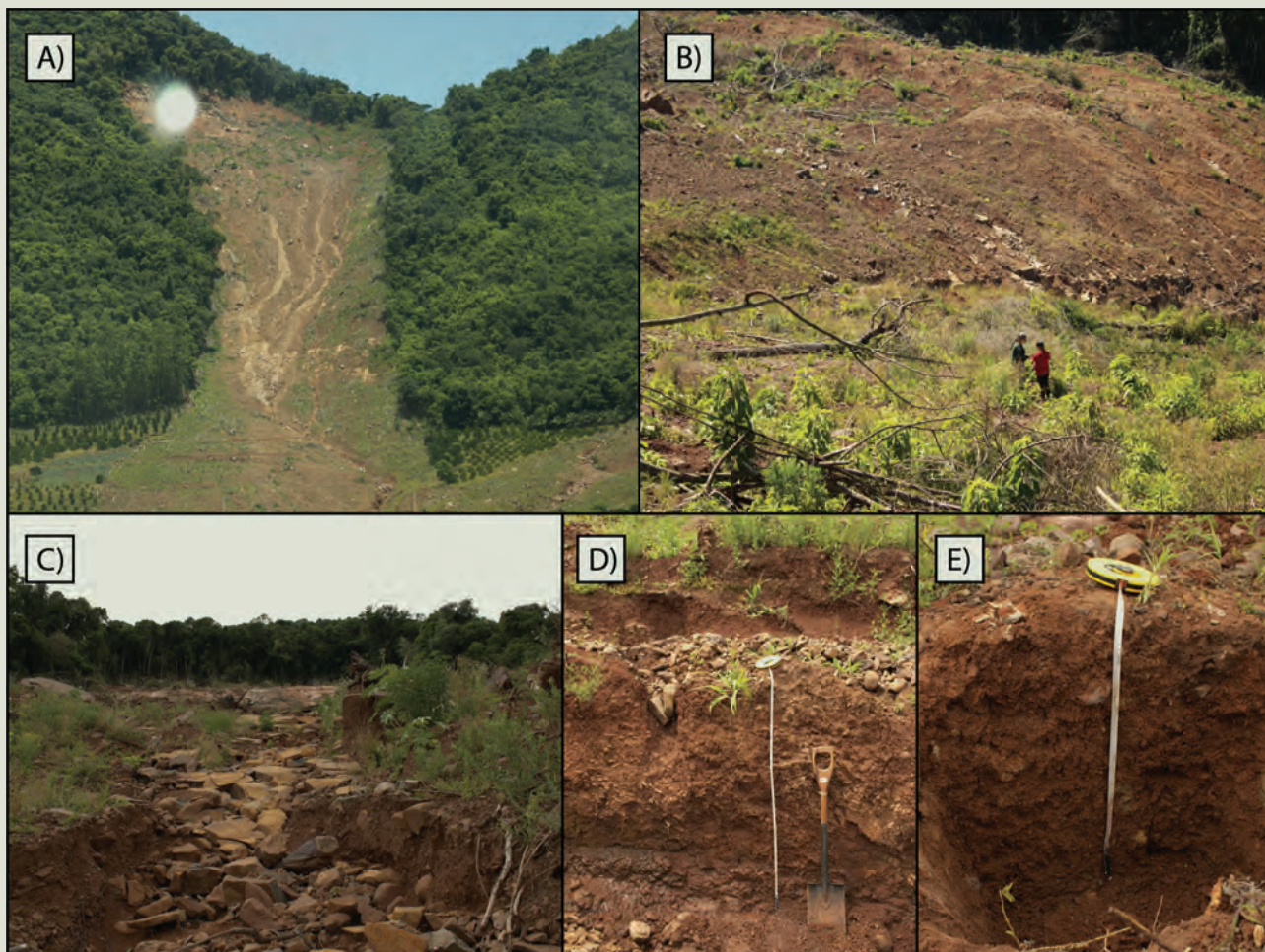


Imagem fornecida pelo autor

Figura 6. Fotos de áreas de deslizamento de terra no Vale do Rio das Antas, no Rio Grande do Sul. A) Área de movimentação de material sobre pomar; B) Área de vinhedo com deposição de material. C) Deposição de solo provocada pelas enxurradas na Serra Gaúcha; D) Trincheira aberta mostrando a profundidade de sedimento até o topo original do solo; E) Trincheira aberta mostrando a profundidade de sedimento depositado até a rocha. *Fonte: os autores (2024).*

50 mg dm⁻³ ao longo das camadas das trincheiras. De maneira interessante, na trincheira 2 os valores de P disponível aumentaram em cerca de duas vezes a partir da camada de 80 cm. Isso possivelmente se deve à deposição de material com baixos de teores de P disponível sobre a camada original do solo, que era área de pomar com histórico de aplicação de fertilizantes. O material

deposto, por sua vez, pode ter diversas origens: solo nativo de mata, solo do próprio pomar das camadas superficiais ou das camadas subsuperficiais. Como o pH ao longo das camadas é superior a 5,5, cremos que o material é originário da camada superficial do próprio pomar, e os teores inferiores de P disponível se devem à perda desse elemento pelo escoamento superficial.

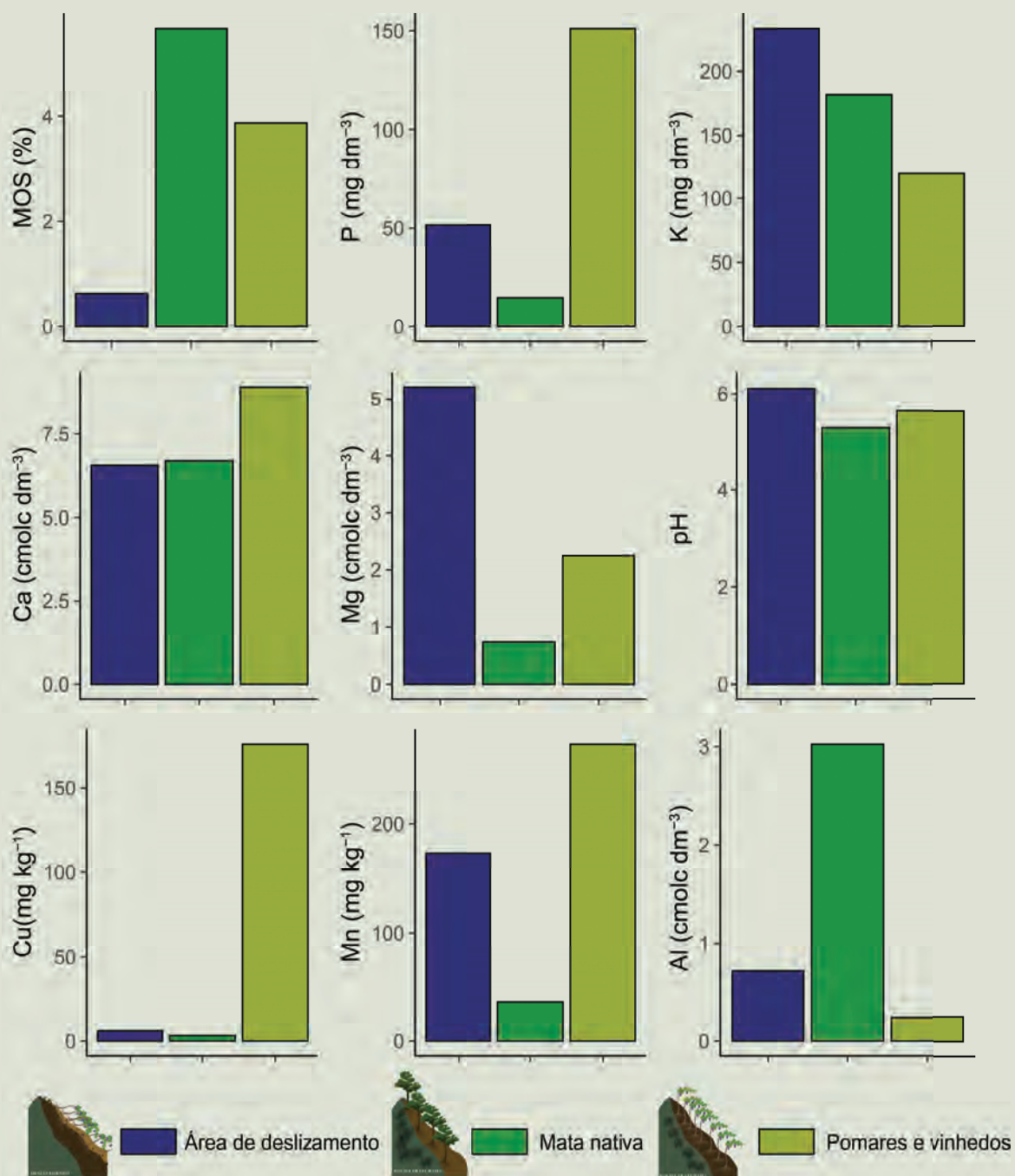


Figura 7. Valores médios de matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P) e potássio (K) disponíveis por Melich-1, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis, pH do solo em água (pH), cobre (Cu) e manganês (Mn) disponíveis por EDTA na camada de 0 a 20 cm de solo de áreas de deslizamento de terra (azul), matas nativas ou regeneradas (verde) e pomares e vinhedos (amarelo) amostrados no Vale do Rio das Antas.

Os valores de K disponível foram mais elevados na área de deslizamento (230 mg dm^{-3}), seguidos pela mata nativa (171 mg dm^{-3}) e pelos pomares e vinhedos (120 mg dm^{-3}), o que pode ser explicado pela erosão que concentra esse nutriente no solo depositado. Já o Ca é mais abundante nos pomares e vinhedos ($8,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), reflexo do manejo de correção da acidez, enquanto a mata nativa ($6,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e a área de deslizamento ($6,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) apresentam valores inferiores. O Mg também é mais elevado na área de deslizamento ($5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); os pomares e vinhedos ($2,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) possuem níveis intermediários e a mata nativa tem os menores valores ($0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

O Cu, conforme comentado previamente, é mais elevado nos pomares e vinhedos, enquanto a mata nativa e a área de deslizamento apresentam valores muito baixos. O Mn é mais concentrado nos pomares e vinhedos (273 mg dm^{-3}), enquanto as áreas de deslizamento apresentam valores intermediários (176 mg dm^{-3}) e a mata nativa valores expressivamente menores (37 mg dm^{-3}). Normalmente, parte do Cu e Mn presentes em solos de vinhedos e pomares são derivados das aplicações de fungicidas, usados para o controle preventivo de doenças em folhas e frutos (Brunetto *et al.* 2014; 2016). Por fim, o alumínio (Al), elemento tóxico às plantas, é mais abundante na mata nativa ($2,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), seguido pela área de deslizamento ($0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto os pomares e vinhedos apresentam os menores valores ($0,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), possivelmente devido à correção da acidez do solo por meio da aplicação de calcário. Porém, possivelmente, esse material deposto possui algum tipo de mistura de solo corrigido com solo não corrigido. Na Figura 9, as trincheiras 2 e 3 tiveram menores valores de pH do solo nas camadas superiores, quando comparados com camadas mais profundas. Também essa diminuição do pH em superfície pode ter ocorrido devido à elevada

mineralização da MOS, que comumente é mais concentrada nas camadas mais superficiais.

De forma geral, a mata nativa apresenta maior equilíbrio natural, com altos teores de MOS, mas também maior acidez devido ao teor de Al (Figura 11). Os pomares e vinhedos refletem manejo intensivo de correção da acidez, e fertilidade do solo, com altos teores de nutrientes como P, Ca, mas menor MOS (Figura 11). Contudo, esse impacto é comum em áreas agrícolas e, comumente, na fruticultura é minimizado pelo baixo revolvimento do solo, que traz danos à sua biologia do solo e causa perda da MOS; e pela manutenção de plantas de cobertura nas entrelinhas de cultivo, que aumentam a biodiversidade do ecossistema e aumentam a MOS. Já as áreas de deslizamento apresentam sinais claros de degradação, com baixos teores de MOS e desbalanço nutricional, embora alguns elementos, como Mg, estejam em concentrações elevadas, possivelmente devido à erosão e exposição do solo (Figura 11). O deslizamento de terra modifica intensamente a estrutura do solo e, assim, altera o metabolismo dos organismos do solo, que podem ter atuado similarmente a um revolvimento muito severo, consumindo quase a totalidade da MOS. Além disso, a MOS está presente no solo em diferentes frações relacionadas ao seu tamanho: fração grossa, que está associada a grãos de areia ou ainda é um material pouco degradado, e fração fina, que está associada a partículas de silte e argila, muito menores que grãos de areia. Com o elevado escoamento superficial causado pela alta intensidade de chuvas, as partículas do solo mais finas (silte e argila) são mais facilmente perdidas junto com a água da chuva, em comparação à fração mais grossa. Como grande parte da MOS dos solos da Serra Gaúcha está na fração fina (Kokkonen *et al.*, 2024), acredita-se que essa fração tenha sido perdida através desse fenômeno.

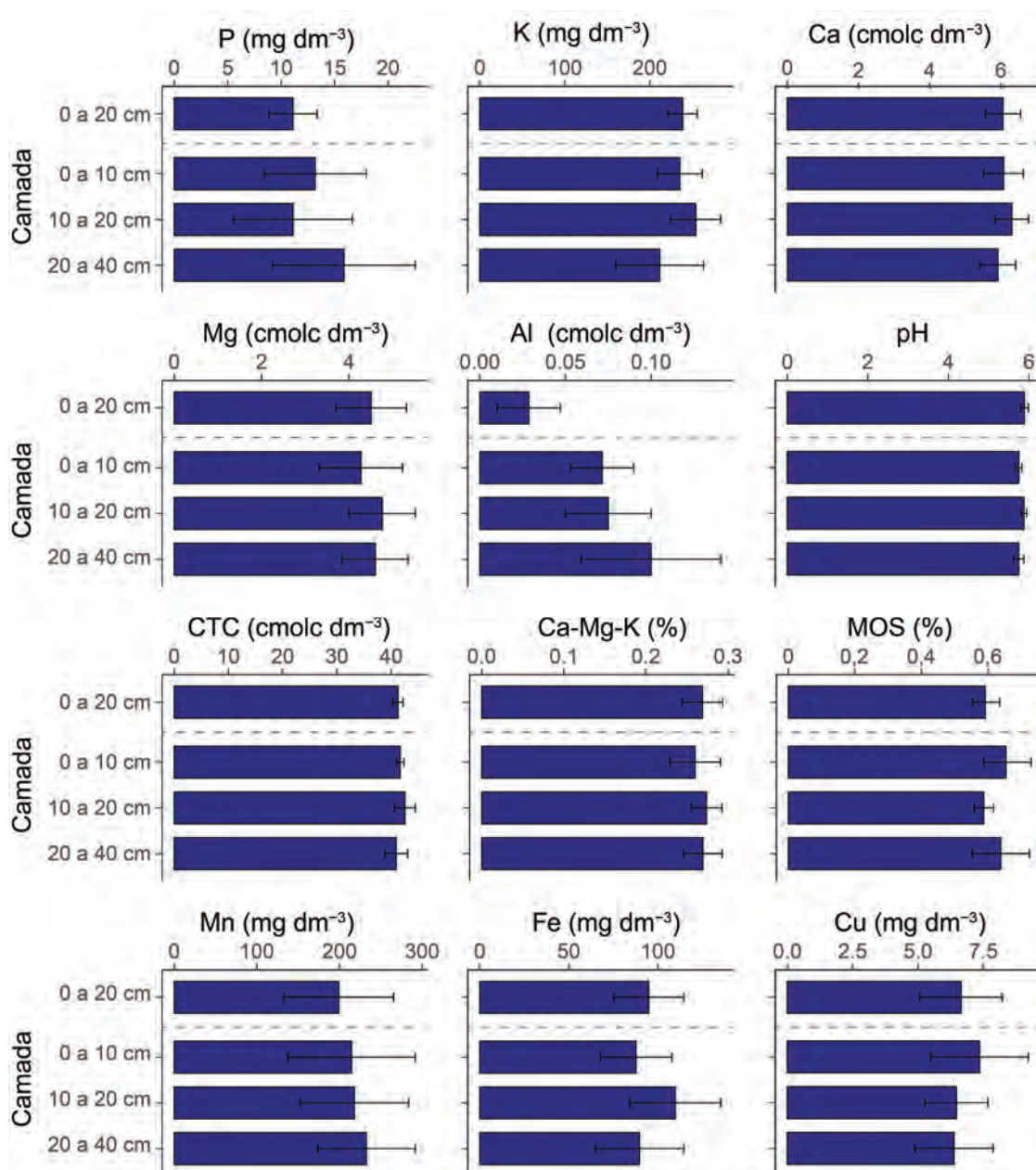


Figura 8. Valores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis por Melich-1, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis, pH do solo em água (pH), capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC), saturação por Ca-Mg-K (Ca-Mg-K), matéria orgânica do solo (MOS), manganês (Mn), ferro (Fe) e cobre (Cu) disponíveis por EDTA em diferentes camadas de áreas de deslizamento de terra no Vale do Rio das Antas, RS.

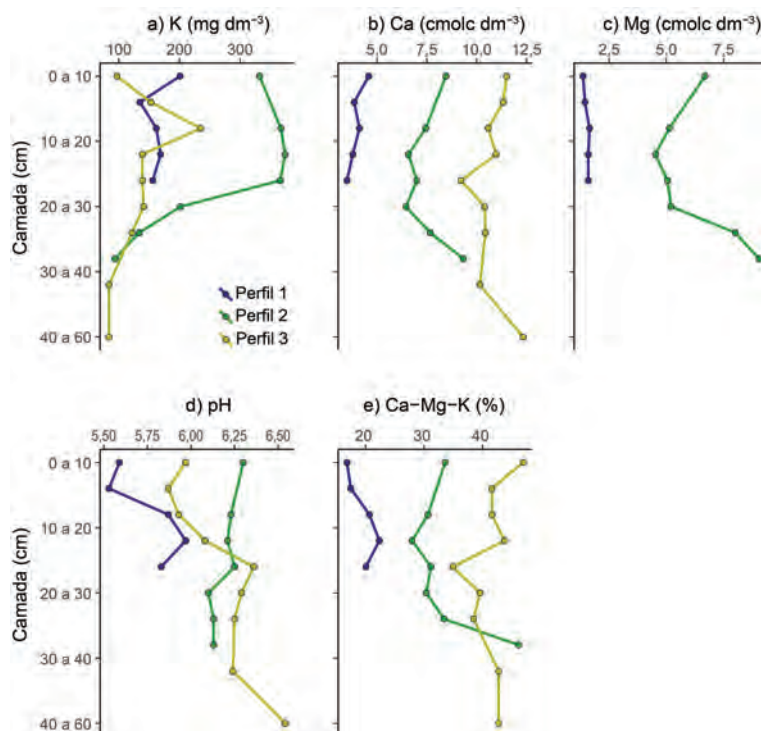


Figura 9. Valores de potássio disponível por Melich-1 (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, pH do solo em água (pH) e saturação por Ca-Mg-K (Ca-Mg-K) em diferentes camadas, em três perfis de solo (Perfil 1 = verde; Perfil 2 = amarelo; Perfil 3 = azul) coletados em áreas de deslizamento de terra, no Vale do Rio das Antas (RS).

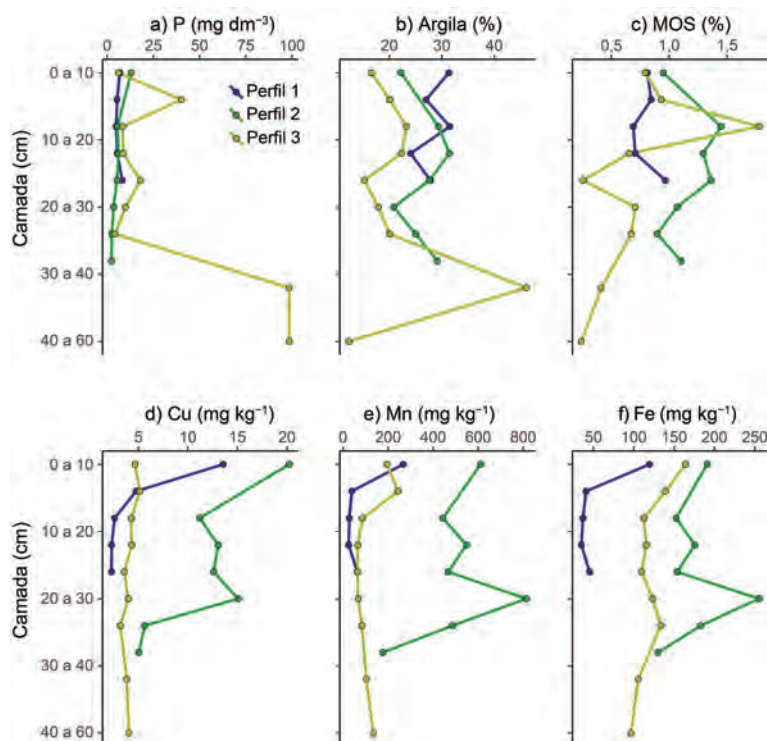


Figura 10. Valores de fósforo disponível por Melich-1 (P), teor de argila (argila), matéria orgânica do solo (MOS), cobre (Cu), manganês (Mn) e ferro (Fe) disponíveis por EDTA em diferentes camadas, em três perfis de solo (Perfil 1 = verde; Perfil 2 = amarelo; Perfil 3 = azul) coletados em áreas de deslizamento de terra, no Vale do Rio das Antas, RS.

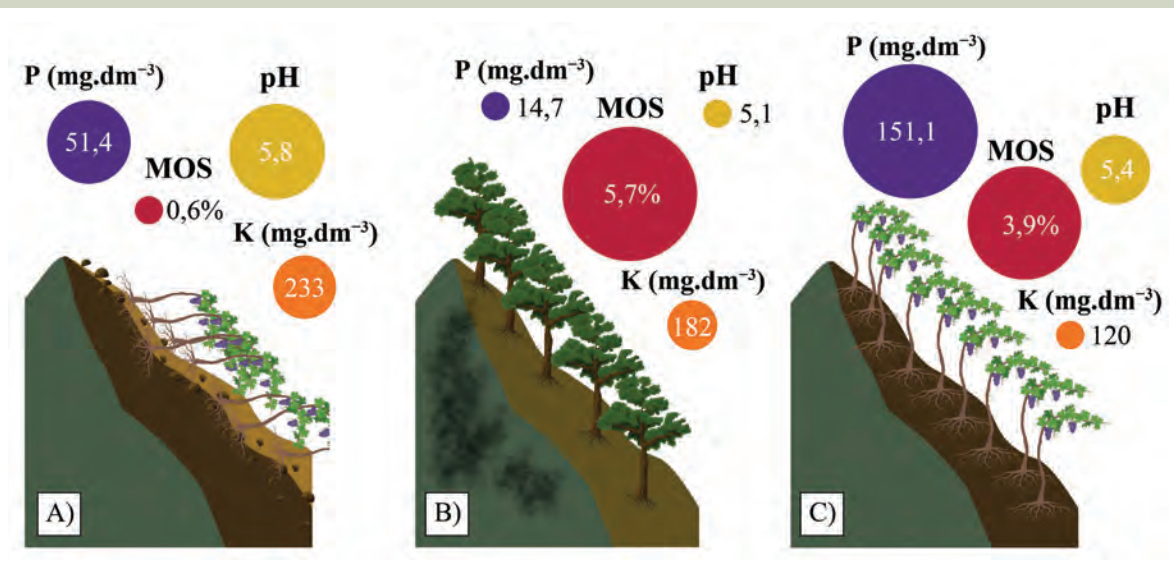


Figura 11. Resumo gráfico do teor de fósforo e potássio disponíveis (P e K, respectivamente), pH do solo e matéria orgânica do solo (MOS) em áreas de deslizamento (A), áreas de solo nativo (B) e áreas de vinhedos (C) no Vale do Rio das Antas, RS.

4. Diagnóstico da aptidão agrícola das terras

A aptidão agrícola das terras é um sistema de avaliação do uso potencial de terras que considera as limitações – às práticas de uso da terra – associadas ao solo, declividade e regime hídrico (Ramalho; Beck, 1995). Esse sistema distingue grupos, subgrupos e classes de aptidão agrícola. Os grupos 1, 2 e 3 indicam simultaneamente que as terras possuem aptidão para lavouras (Ramalho; Beck, 1995). Os grupos 4, 5 e 6 indicam aptidão para pastagem plantada (P); silvicultura (S) e pastagem natural (N); e preservação da fauna e da flora, respectivamente. A fruticultura, que envolve cultivos perenes, não está incluída no documento original. No entanto, para os fins deste artigo, será considerada parte do grupo 5, devido às suas características de manejo, especialmente do solo, que são mais similares à silvicultura. Nos grupos 1, 2 e 3 os níveis

de manejo (subgrupos) são representados pelas letras A, B e C, onde A representa o nível de manejo primitivo – sem manejo significativo pelo ser humano –, B manejo pouco desenvolvido – que significa manejos de nível tecnológico médio, como aplicação de calagem e fertilizantes – e C manejo desenvolvido – que representa alto aporte de capital de tecnologias mais avançadas, como mecanização do processo produtivo. Em cada subgrupo, existem quatro classes de aptidão: boa, regular, restrita e inapta. As classes, por sua vez, são representadas por letras maiúsculas, para aptidão boa; minúsculas, para aptidão regular; entre parênteses, para aptidão restrita; e sem indicação, para aptidão inapta – tudo isso dentro de cada subgrupo (níveis de manejo). Por exemplo, uma área que for enquadrado na classe 1(a)bC está no grupo 1 (lavouras anuais), com aptidão *restrita* no nível tecnológico a, aptidão *moderada* no nível tecnológico b e aptidão *boa* no nível

Quadro 1. Limitações à produção agrícola e aptidão agrícola das terras em áreas de deslizamento de terra no Vale do Rio das Antas. F = forte, M = moderada, L = ligeira, N = nula.

Pontos	Limitações					Classe de aptidão ⁽¹⁾
	Fertilidade do solo	Deficiência de água	Excesso de água	Impedimento à mecanização	Susceptibilidade à erosão hídrica	
1	F	N	L	F	F	5s - Regular
2	M	N	N	F	F	5S - Regular
3	F	N	L	F	F	5s - Regular
4	F	N	L	F	F	5s - Regular
5	M	N	N	F	F	5S - Regular
6	F	N	L	M	F	3bc - Boa
7	M	N	N	F	F	5S - Regular
8	F	N	N	F	F	5S - Regular
9	F	N	N	F	F	5S - Regular
10	F	N	N	F	F	5S - Regular

Classes do sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras conforme Ramalho Filho; Beek (1995).

tecnológico c. Outro exemplo: uma área que for classificada como 5S possui aptidão *boa* para silvicultura. No presente estudo, a classe 5S também indica boa aptidão para a fruticultura.

Os locais de amostragem 1, 3 e 4 (Quadro 1) foram enquadrados na classe "5s", os quais apresentam aptidão *regular* para silvicultura e/ou fruticultura, com limitações *fortes* de fertilidade do solo, mecanização e suscetibilidade a erosão. Os pontos 2, 5, 7, 8, 9 e 10 foram enquadrados na classe "5S" (Quadro 1), os quais apresentam aptidão *boa* para silvicultura e/ou fruticultura, tendo limitações *moderadas a fortes* de fertilidade do solo, mecanização e suscetibilidade a erosão. O ponto 6 foi enquadrado na classe "3bc" (Quadro 1), com aptidão *regular* para lavouras anuais e fruticultura, tendo limitações *fortes* de fertilidade e suscetibilidade a erosão e *moderadas* para mecanização.

Com relação à limitação *fortes* de fertilidade do solo, isso é devido à elevada acidez do solo e presença de Al tóxico, somado aos baixos

teores de nutrientes no solo, principalmente P e K. Esse tipo de limitação pode ser corrigido por meio de práticas de correção da acidez (calagem) e aplicação de fertilizantes químicos ou orgânicos. Já as limitações relacionadas à erosão e mecanização são em decorrência da pouca profundidade do solo, elevada declividade do terreno e presença de pedregosidade na superfície do solo. Em relação a essas duas limitações, não existem práticas de manejo para solucionar essas limitações.

5. Recomendação de adubação e práticas de manejo

5.1. Análise de solo e recomendação de adubação

A maioria das áreas amostradas possuem boa fertilidade do solo. Desta forma, recomendamos que seja realizada análise de solo antes da aplicação de fertilizantes ou corretivos de acidez (calagem), para evitar aplicações excessivas, que podem resultar em contaminação ambiental. Caso seja necessária

a adubação, em solos em que a área ainda não foi trabalhada, isto é, renivelada ou construídos patamares, recomenda-se a incorporação da adubação fosfatada e/ou do corretivo de acidez do solo. Em áreas que já foram trabalhadas, e que não apresentam grandes restrições de acidez na camada de 0 a 20 cm do solo, recomenda-se a aplicação dos adubos e/ou corretivos em superfície em área total, a exceção de adubos em cultivos com frutíferas, situação em que devem ser aplicados nas linhas de cultivo.

Salientamos, porém, que a análise prévia do solo é necessária por outros motivos. Caso a fertilidade da área não esteja adequada, a aplicação de fertilizantes pode ser feita antes do restabelecimento dos agroecossistemas. Após implementação de culturas perenes, como pomares e vinhedos, por exemplo, existe grande dificuldade em trabalhar no solo e incorporar efetivamente os fertilizantes, o que impede seu aproveitamento pelas plantas.

Além da utilização de fertilizantes minerais para elevar os teores disponíveis de nutrientes no solo, outra indicação é a utilização de adubos orgânicos nos pomares. Há vários estudos indicando que a adição de material orgânico, como dejetos de animais e composto orgânico, melhora a estrutura do solo (Loss *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2022), o que auxilia na prevenção de erosão hídrica e melhora a drenagem dos solos. Além disso, esse aporte de material orgânico pode ajudar a recuperar a MOS perdida no processo de deslizamento de terra. Assim, além da melhoria física, ao longo do tempo o incremento da MOS resultará na melhoria da fertilidade do solo, principalmente para fornecimento de nitrogênio às plantas. Uma vez que resíduos orgânicos oriundos das agropecuárias são bastante disponíveis na região, recomenda-se a sua utilização como fontes de nutrientes, já que podem auxiliar no suprimento de N, P e K, além de micronutrientes.

Salientamos que, para não aplicar nutrientes em excesso, os resíduos sejam, preferencialmente, analisados quanto à sua composição, ou então que sejam usados os valores tabelados no Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS/RS-SC, 2016). Além disso, destacamos que é prudente a realização de pesquisas futuras, para verificar se as recomendações de calagem e adubações existentes serão eficientes para corrigir a acidez do solo e elevar os teores de nutrientes até níveis adequados, em solos onde houve a perda de matéria orgânica e outras partículas como argila.

5.2. Uso de plantas de cobertura

Além da calagem e adubação, outras práticas são essenciais para a recuperação das áreas para cultivo, bem como para prevenção de perdas futuras de solo. Plantas de cobertura melhoram as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando sua qualidade, prevenindo erosão e promovendo ciclagem de nutrientes. A cobertura permanente ou morta reduz a compactação e erosão, aumenta a biomassa microbiana e atividade biológica, além de melhorar a eficiência no uso de água e nutrientes. Além disso, o aporte de biomassa proveniente das plantas de cobertura será essencial para recuperar a MOS perdida no evento climático ao longo dos anos. Práticas de manejo adequadas, como o uso de plantas de cobertura, são essenciais para a produtividade sustentável em pomares e a prevenção da perda de solo (Loss *et al.*, 2023). Com o aporte de carbono e material orgânico dos adubos orgânicos e da biomassa das plantas de cobertura, bem como o crescimento radicular das culturas, a MOS poderá ser recuperada ao longo dos anos, recobrando parcial ou totalmente a qualidade do solo. Além disso, o uso de espécies de cobertura, em especial em combinação de espécies, aumenta a complexidade dos agroecossistemas e pode elevar a diversidade microbiológica



Serra do Rio das Antas

do solo também, o que é desejado. Os micro-organismos do solo auxiliam na mineralização de materiais orgânicos no solo, o que aumenta a disponibilidade de nutrientes às culturas.

6. Considerações finais e perspectivas futuras

O evento extremo climático observado no RS, como precipitações elevadas em curto intervalo de tempo, nos meses de abril e maio de 2024, causou perdas de solo, água e nutrientes, na região da Serra Gaúcha, que foi a região estudada e apresentada no presente texto. Isso prejudicou o plantio, crescimento e produção de várias culturas, como as frutíferas. Desta forma, atualmente as cadeias produtivas precisam acessar conhecimentos pacificados na comunidade científica, bem como outros atuais, que podem embasar

práticas e tecnologias que contribuem para a conservação de solos, como o uso de terraços e patamares, cultivo de plantas de cobertura do solo, uso de resíduos orgânicos como fontes de nutrientes etc. Além disso, é essencial realizar a amostragem de solo e tecido vegetal das plantas, interpretar os resultados e, quando necessário, proceder à aplicação de corretivos da acidez e fertilizantes. Tudo isso associado poderá manter ou melhorar a fertilidade do solo, o que contribuirá no incremento da produtividade de plantas, mas também ajudará na melhoria de atributos biológicos e físicos do solo, o que é desejado para maximizar a infiltração de água. Mas, caso no futuro próximo aconteçam eventos climáticos extremos, a metodologia de amostragem do presente capítulo poderá ser utilizada como referência, para monitorar os danos em áreas, e os resultados obtidos poderão

ajudar na tomada de decisões técnicas que podem contribuir para a recuperação de solos degradados por deslizamentos e enxurradas. Considerando isso, sugerimos as seguintes tecnologias para embasar o desenvolvimento e aplicação de políticas públicas, que objetivem recuperar áreas degradadas e possam garantir maior resiliência em caso de eventos futuros:

a) Atualização de sistemas de recomendação de calagem, incluindo solos degradados, para evitar o uso excessivo ou deficiente de corretivos da acidez do solo e fertilizantes;

b) Políticas de crédito que remunerem produtores e produtoras rurais pela MOS estocada (carbono estocado no solo) em sistemas agroalimentares, reconhecendo esse serviço que pode auxiliar a ação pelo clima, ao mesmo que melhora a qualidade do solo em sistemas de cultivo e, por conseguinte, sua produtividade de resiliências frente a eventos extremos. As políticas de crédito podem funcionar na forma de selos, que recompensem sistemas de produção com menor gasto de carbono;

c) Políticas de crédito que remunerem produtores e produtoras rurais pelo serviço prestado de captação de água, similarmente ao item b. Sistemas de produção com práticas conservacionistas, como os propostos neste texto, são responsáveis por maximizar a infiltração da água da chuva em solos, que reabastecem os reservatórios naturais (rios, aquíferos), fornecendo água para a sociedade. Ao contrário, sistemas que não adotam práticas, como terraceamento e cobertura do solo, favorecem o escoamento da água em detrimento de sua infiltração, o que maximiza erosão hídrica, perda de nutrientes e MOS e assoreamento de cursos de água. Entretanto, não existe qualquer tipo de remuneração aos agricultores e

agricultoras sobre esse serviço prestado. Essa remuneração, que pode ser executada via políticas públicas ou de crédito, garante a esfera econômica da sustentabilidade dos agroecossistemas;

d) Incentivo à pesquisa e inovação dentro da adubação orgânica. Existem alguns fatores que ainda limitam em ordem prática e logística a aplicação de adubos orgânicos, como, por exemplo, dificuldade de transporte em longas distâncias e aplicação mecanizada. Entretanto, com mais subsídio público à pesquisa e inovação, novas formulações e modos de aplicação de fertilizantes à base de fontes orgânicas podem ser inseridas no mercado.

Referências

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22(6): p. 711-728, 2013.
- ANGELO, C.; MARENGO, J. A. *Resumo comentado do SPM (Sumário para Tomadores de Decisão) do Grupo de Trabalho 1 do IPCC no Sexto Relatório de Avaliação (AR6)*. Observatório do Clima e Cemaden, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- BRUNETTO, G. et al. Copper and zinc fractions in vineyard soils in the Middle Western of Santa Catarina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18:805-10, 2014.
- BRUNETTO, G. et al. Copper accumulation in vineyard soils: rhizosphere processes and agronomic practices to limit its toxicity. *Chemosphere*, 162:293-307, 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS – CNM. *Análise dos impactos de desastres hidrometeorológicos nos municípios brasileiros (2013-2022)*. Brasília: CNM, 2023. Disponível em: <https://www.cnm.org.br>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- COELHO, Cíntia de Albuquerque Wanderley et al. *Mudança do clima no Brasil: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas*. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). *The impact of disasters and crises on agriculture and food security*. 2023. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- GUIMARÃES, P. V. et al. *Evento catastrófico da região serrana do Rio Grande do Sul no fim de abril de 2024*. 51º Congresso Brasileiro de Geologia, 2024, Belo Horizonte, MG. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Geologia, 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *PAM – Produção Agrícola Municipal*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CHANGE CLIMATE – IPCC.
Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CHANGE CLIMATE – IPCC.
Summary for policymakers. Contribution of Working Group II to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CHANGE CLIMATE – IPCC.
Mudança do clima 2023: relatório síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Eventos extremos: chuvas acima da média marcam maio de 2024. Brasília, DF. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/eventosextrremos-Brasil-maio2024>. Acesso em: 9 dez. 2024.
- LOSS, A. *et al.* Uso e manejo do solo em pomares: ênfase em plantas de cobertura. BRUNETTO, G. *et al.* *Estratégias de manejo para melhorar o aproveitamento de nutrientes em frutíferas.* Santa Maria (RS): Editora Palotti, 2023.
- LOSS, ARCÂNGELO *et al.* Carbon, nitrogen and natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in biogenic and physiocogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. *Soil and Tillage Research*, v. 166, 2017, p. 52-58.
- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras.* Rio de Janeiro: Embrapa – CNPS, 1995.
- SANTOS, C. *et al.* Aggregation index and carbon and nitrogen contents in aggregates of pasture soils under successive applications of pig slurry in southern Brazil. *Agronomy*, 12(2), 2022, p. 320.
- TEDESCO, M. J. *et al.* *Análise de solo, plantas e outros materiais.* Porto alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, 1995. (Boletim Técnico, 5).
- TAZZO, Ivonete Fatima *et al.* Condições meteorológicas ocorridas em maio de 2024 e situação das principais culturas agrícolas no estado do Rio Grande do Sul. *Comunicado Agrometeorológico*, n. 70. Porto Alegre, 2024, p. 6-30.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant*, 19, 1988, p. 1467-1476.

Equipe de trabalho

- Gustavo Brunetto
Prof. dr. em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Allan Augusto Kokkonen
Doutorando em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Ana Luiza Lima Marques
Mestranda em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Laura Silva Dunker
Mestranda em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Bruna Trevizan Paese
Mestranda em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Jean Michel Moura-Bueno
Prof. dr. em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e na Universidade de Cruz Alta (Unicruz)
- Douglas Luiz Grando
Doutorando em Ciência do Solo na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Lucas Peranzoni Deponti
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Samuel Schemmer
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Bruno Ehle de Souza
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Cauan Guerra Martins
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Rian Brondani
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Maria Eduarda Costa Reis Araújo
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Alex Benetti
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Katriel Pettermann Bertoldo
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- Lenon Cerentini
Graduando em Engenharia Florestal na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
- André Schröder Buss
Graduando em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)





Aplicação de um Digital Twin para prognóstico e mitigação dos efeitos da inundação nas cidades às margens da Lagoa dos Patos

ELISA HELENA FERNANDES
GLAUBER ACUNHA GONÇALVES





RESUMO

As regiões costeiras estão entre as áreas mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas globais, com suscetibilidade direta a eventos climáticos extremos. Particularmente no Brasil, a ausência de políticas públicas voltadas à prevenção e mitigação dos impactos desses eventos extremos nas regiões costeiras agrava esse cenário, conforme observado no evento de inundação de maio de 2024 no Rio Grande do Sul. Nesse contexto, soluções tecnológicas inovadoras associadas a recursos de livre acesso podem ser valiosas para garantir a segurança da população e do patrimônio público e privado, subsidiando a proposição de políticas públicas efetivas e a construção de regiões costeiras resilientes.



Nasa

Lagoa dos Patos vista em imagem por satélite, em 2023.

1. Contextualização do problema: estudo de caso da cidade de Rio Grande

Desde o final do século XX, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) vem apresentando evidências do impacto humano irreversível sobre o clima (IPCC, 1995; 2001), com projeções de que o permanente aquecimento global vai intensificar ainda mais a severidade e frequência dos eventos extremos, tais como ondas de calor, chuvas e estiagens intensas (IPCC, 2023). Como consequência, o risco

de desastres naturais e de impactos setoriais na segurança hídrica, alimentar, energética, social e da saúde representa grandes desafios ao Brasil e ao mundo neste século.

As regiões costeiras estão entre as áreas mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas globais, com suscetibilidade direta a eventos climáticos extremos (IPCC, 2023). Esses eventos causam problemas de segurança para a população, devido à ocorrência de ondas mais altas e ao aumento do nível do mar na costa, fortes precipitações e inundações, estiagens extremas e condições de ventos severos (ciclones). Portanto, as

regiões costeiras requerem estudo científico dedicado ao entendimento de causas, riscos e impactos dos eventos extremos, bem como ao desenvolvimento de ferramentas e medidas de prevenção que apoiem a emissão de alertas de risco, visando mitigar os impactos à sociedade e promover resiliência e sustentabilidade nas regiões atingidas.

O ano de 2024 foi considerado o mais quente dos últimos séculos. Entre o final de abril e início de maio de 2024, as maiores inundações já observadas no Brasil em 125 anos de dados ocorreram no estado do Rio Grande do Sul (Collischonn *et al.*, 2024a, b; Marengo *et al.*, 2024). Enchentes rápidas com níveis extremos de água ocorreram em regiões montanhosas, enquanto nas áreas mais baixas as cheias tiveram longa duração. Esse desastre ocupa a primeira posição no Brasil em número de pessoas deslocadas e danos a propriedades e infraestruturas, somando quase 200 vítimas fatais (Pillar; Overbeck, 2024).

As metodologias convencionais de monitoramento da dinâmica de ambientes costeiros que geram alertas de desastres naturais com precisão e rapidez normalmente utilizam abordagens baseadas em dados de campo, no entanto, fornecem informações geralmente limitadas no espaço e no tempo. Além disso, essas informações valiosas muitas vezes não estão prontamente disponíveis para gestores e tomadores de decisão. Outro fator de alto impacto na baixa eficiência desses métodos convencionais é a escassez de produtos cartográficos adequados para representar os territórios onde os processos produzem impactos. Essas limitações resultam numa compreensão insuficiente da variabilidade espaço-temporal do impacto do evento no meio físico, o que torna difícil prever como essas áreas responderão a tais eventos meteorológicos e hidrológicos, impedindo mitigar seus efeitos.

O conhecimento preciso de ambientes costeiros complexos e sua qualificada modelagem em ambientes computacionais em alta resolução e desempenho são hoje fundamentais para proteção da sociedade em relação à incidência de eventos extremos. O contínuo dos ambientes costeiros compreende o comportamento físico das bacias de drenagem e de corpos e cursos d'água, a sua interação com os processos atmosféricos, e o impacto desses sobre os territórios limítrofes, incluindo os ambientes urbanos às margens de estuários e lagoas.

Soluções tecnológicas inovadoras associadas a recursos de livre acesso podem ser valiosas para a (re)construção de regiões costeiras resilientes. A ciência contemporânea internacional apresenta o conceito Digital Twins (Gêmeos Digitais) como uma alternativa tecnologicamente robusta que se expandiu consideravelmente na última década, devido ao crescimento da computação de bancos de dados, Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT) (Voosen, 2020), gerando réplicas virtuais de ambientes naturais (Pillai *et al.*, 2022).

A Sociedade Brasileira de Computação (SBC) propôs soluções digitais voltadas à sustentabilidade e mudanças climáticas (Pias e Macêdo, 2022), apresentando ações estratégicas e destacando o uso de Digital Twins para integrar sistemas e dados ambientais, permitindo simulações e suporte à tomada de decisões (Pias *et al.*, 2023). Em 2022, a International Federation for Information Processing (Ifip) criou a Força-Tarefa de Tecnologias Digitais e Mudanças Climáticas para explorar o uso de tecnologias digitais no combate às mudanças climáticas. O relatório final apresenta estratégias, desafios e recomendações para governos, indústria e setores estratégicos, enfatizando educação, conscientização pública e o papel crítico das tecnologias digitais na mitigação climática (Macêdo *et al.*, 2024).

Dentro deste contexto e seguindo estes desenvolvimentos, o primeiro Digital Twin ambiental do Brasil está sendo consolidado no Centro Interinstitucional de Observação e Previsão de Eventos Extremos (CIEEX – FURG), e está baseado em conjuntos de dados meteorológicos, oceanográficos e geodésicos combinados com modelos numéricos de previsão e métodos de inteligência artificial e visão computacional, que fornecem uma réplica virtual do ambiente, o Digital Twin Lagoa dos Patos (DT – Lagoa) (Figura 1). Essa

metodologia foi amplamente testada e validada durante o evento de inundação de maio de 2024, quando, em função do estímulo científico e da demanda das forças de segurança pública, o Comitê de Avaliação e Prognóstico de Eventos Extremos da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) se organizou para aplicar um modelo colaborativo e integrado para atender a demanda de conhecimento do fenômeno em período imediato a sua chegada aos municípios situados às margens da Lagoa dos Patos.

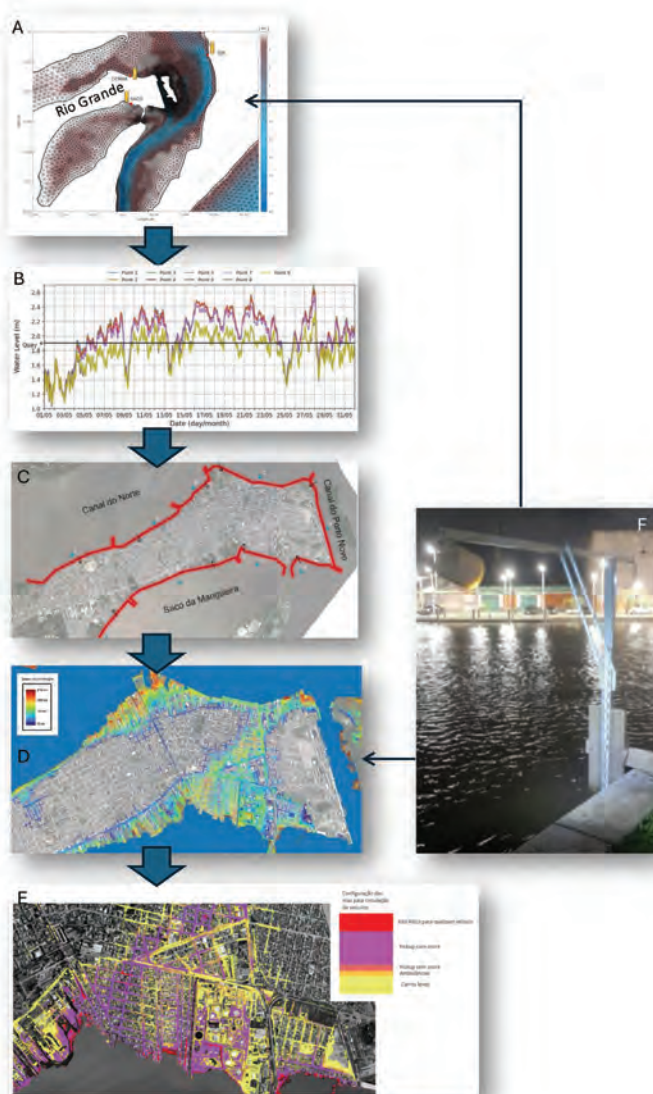


Figura 1. O conceito do Digital Twin Lagoa dos Patos (DT – Lagoa). Dados meteorológicos (precipitação, ventos), geodésicos (do terreno) e oceanográficos (nível) alimentam o ambiente virtual para a adequada observação das condições ambientais em tempo real, e são utilizados para a qualificação dos modelos numéricos (hidrológico e hidrodinâmico) e de modelos computacionais de Inteligência Artificial (modelo de inundação), gerando previsões sobre o comportamento hidrodinâmico da Lagoa dos Patos e os impactos sobre os municípios localizados às suas margens. Essas previsões foram utilizadas para tomada de decisão pelas forças de segurança pública durante o evento de inundação de maio de 2024.

A Figura 2 apresenta os resultados da integração dessas informações para a cidade de Rio Grande durante o evento de maio de 2024, no dia de máxima inundação (16 de maio). O modelo hidrodinâmico da Lagoa dos Patos (Fig. 2A) forneceu a previsão do comportamento do nível para diferentes pontos ao redor da cidade de Rio Grande (Fig. 2B). Esses dados alimentaram

o modelo computacional de segmentação da orla partindo desses mesmos pontos (Fig. 2C), resultando no modelo de inundação da cidade (Fig. 2D) sobre o modelo digital de terreno de Rio Grande. Esse produto foi então aplicado sob diversas técnicas de representação, gerando subprodutos customizados entregues à população e às forças da Defesa Civil, que avaliaram as

Figura 2. O conceito do DT – Lagoa aplicado à inundação de maio de 2024 em Rio Grande. A) Detalhe da grade numérica do modelo hidrodinâmico ao redor da cidade de Rio Grande, B) previsão do comportamento do nível calculada pelo modelo hidrodinâmico em pontos ao redor de Rio Grande alimentando o C) modelo computacional de segmentação nesses mesmos pontos, resultando no D) modelo de inundação, onde a escala de cores indica a altura de água nas ruas da cidade no dia de máxima inundação (16 de maio). E) Uma aplicação das informações geradas é o tipo de veículo que podia trafegar pelas ruas da cidade de Rio Grande, em 16 de maio. F) Linígrafo instalado no CCMar-Rio Grande, disponibilizando dados de nível com resolução horária para o permanente acompanhamento da situação de inundação na cidade e validação em tempo real das previsões das condições de inundação e do modelo hidrodinâmico.



melhores alternativas para a segurança da população e da infraestrutura da cidade. Um exemplo de aplicação imediata dos resultados produzidos é apresentado na Figura 2E, onde são representadas as vias públicas classificadas em relação à segurança para o tráfego de diversas classes de veículos, em função da altura da lâmina d'água nessas vias. Esse dado permitiu o melhor planejamento da operação de evacuação do Hospital Universitário da FURG e o resgate seguro da população localizada nas regiões mais atingidas durante o evento. Os dados da Rede de Monitoramento de Nível (Fig. 2F) foram disponibilizados à comunidade com resolução horária para o permanente acompanhamento da situação de inundação na cidade e validação em tempo real das previsões das condições de inundação e do modelo hidrodinâmico.

O conceito do Digital Twin Lagoa dos Patos (DT – Lagoa) é resultante da integração dessas metodologias em ambiente virtual funcionamento em tempo real (24 h/7 dias) e será aqui apresentado com nível de detalhamento suficiente para adaptação e replicação nos mais diversos ambientes do território brasileiro como subsídio à necessidade de estabelecimento de políticas públicas voltadas à prevenção e mitigação dos impactos de eventos extremos nas regiões costeiras.

2. Condições preexistentes para a aplicação do conceito Digital Twin

Os pilares de um sistema de informação para atendimento às demandas complexas relacionadas ao enfrentamento de eventos extremos são: i. a existência de dados atualizados, precisos, em formato adequado ao consumo de diversas tecnologias; ii. o domínio de softwares especialistas executando em plataformas de hardware robustas; iii. recursos humanos qualificados,

com experiência na atuação em rede de cooperação e no atendimento de necessidades em produção contínua. O desempenho do modelo de ações aplicado em Rio Grande para o enfrentamento ao evento de maio de 2024 deve-se, justamente, ao fato desses pilares estarem consolidados e disponíveis em um mesmo local, à cooperação entre Instituições de Ensino Superior (IES) regionais e à cooperação direta com uma equipe de comunicação social, competente para transformar os complexos resultados produzidos em informações de fácil compreensão pela população.

Observa-se, inicialmente, a questão da disponibilidade de dados fundamentais para os resultados obtidos, que podem ser classificados quanto ao tempo envolvido em sua geração e provisão em duas classes: (i) dados obtidos em longo período de observação e (ii) dados obtidos especificamente durante o evento. No primeiro grupo estão a morfologia dos corpos d'água, a topografia do terreno, o mapeamento das ocupações de caráter urbano e rural, as séries históricas de parâmetros meteorológicos e hidrográficos. No segundo grupo, os dados medidos em tempo real, especialmente medidas de nível dos corpos d'água, os dados de estações meteorológicas automáticas na região de interesse, a vazão dos contribuintes da Lagoa dos Patos, e as saídas de modelos meteorológicos prognósticos. Assim, evidentemente, o sucesso de um sistema de alerta efetivo está na manutenção, ao longo do tempo, de métricas territoriais (levantamentos batimétricos e topográficos, imageamentos em alta resolução) e de sistemas de sensores telemétricos (estações meteorológicas e hidrográficas, especialmente as medidas de nível d'água).

No estudo de caso aqui tratado, entende-se que projetos de cooperação técnica e produção tecnológica entre IESs, como a FURG, e agentes

de gestão pública, como a Prefeitura Municipal de Rio Grande e a Portos RS (empresa pública de gestão do Porto do Rio Grande), foram fundamentais para que dados de alta qualidade estivessem disponíveis para utilização imediata no período de ocorrência das inundações de 2024. Ao longo dos últimos 10 anos, informações sobre os territórios de Rio Grande, São José do Norte e São Lourenço do Sul, todas cidades às margens da Lagoa dos Patos, foram coletadas e registradas em função de oportunidades de aplicação do conceito de cadastro multifinalitário, regularização fundiária e monitoramento ambiental. E esses dados foram registrados em bases geotecnológicas de alta resolução, ou seja, com imagens aéreas das áreas urbanas, com modelos de terreno ajustados e reduzidos aos referenciais do Sistema Geodésico Brasileiro (IBGE), e com registros vetoriais representando as principais feições de uso e cobertura do solo.

Entre os referidos dados fundamentais, estão os produtos para representar o território, em todas as suas dimensões. Esses produtos, no caso dos municípios em estudo, foram obtidos tanto com a utilização de tecnologias contratualizadas no mercado, quanto por produção própria através de equipamentos e metodologias integradas por diferentes laboratórios da FURG, destacando a importância da integração da academia com os demais setores da sociedade.

No caso de Rio Grande, as informações territoriais de excelência estavam disponíveis e sob total domínio da equipe do Laboratório de Tecnologia da Geoinformação (LTGEO-FURG), pois foram os profissionais do laboratório os responsáveis pela composição do Termo de Referência para Edital de Licitação que resultou nos levantamentos aéreos e na atualização cartográfica do território do município. Além

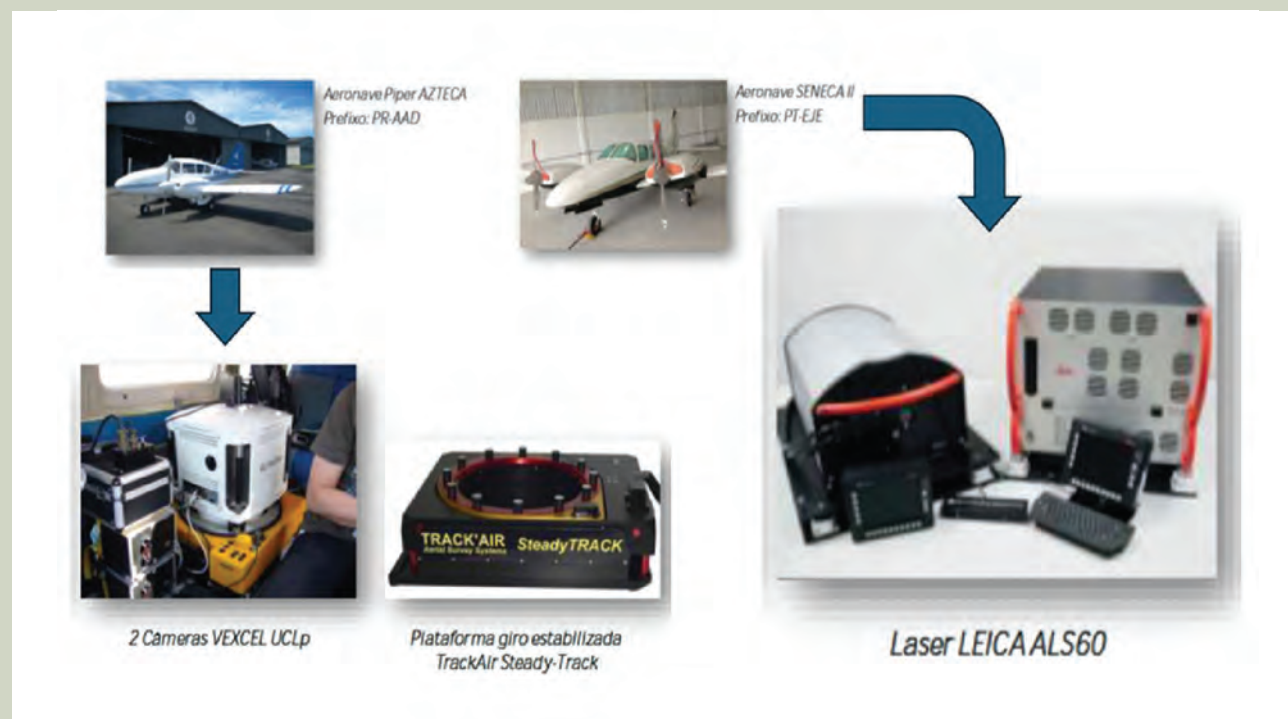


Figura 3. Conjunto instrumental utilizado no mapeamento do município do Rio Grande.¹

disso, esses mesmos profissionais estiveram durante toda obra cadastral acompanhando e fiscalizando as atividades realizadas, ou seja, conheciam profundamente os produtos entregues e confiavam na sua precisão. Especificamente nesse caso, o produto disponível foi resultado de uma operação aerotransportada de grande porte, tripulada, e com aquisição de imagens por câmeras de grande formato, multiespectrais e de varredura laser do terreno, por tecnologia denominada Light Detection and Ranging (Lidar), como indica a composição da Figura 3.

Já nos outros centros urbanos estudados durante o evento de maio de 2024 (São José do Norte e São Lourenço do Sul), os dados foram obtidos pela própria equipe da FURG, com o uso de plataformas aéreas não tripuladas (drones), e com aplicação de metodologia fotogramétrica digital, amparada por denso conjunto de pontos de controle e verificação, adquiridos no território por uso de técnica de posicionamento GNSS RTK, facilitada a operação por uso de pré-sinalização. Ou seja, os técnicos, antes do voo, percorrem a área de interesse e fixam no solo alvos de fácil reconhecimento nas imagens, cujas coordenadas do ponto central são determinadas com uso de um receptor GNSS. Esse sistema, de domínio pleno da comunidade de engenharia com vínculo ao estudo territorial, permite a obtenção de ajustamentos muito precisos, onde erros máximos de posições de objetos na imagem são da ordem de grandeza de 10 cm. A Figura 4 ilustra o processamento fotogramétrico dessas imagens e a amostra do resultado que foi utilizado como base cartográfica para São Lourenço do Sul.

Entenda-se que as imagens nos fornecem dados de alto valor para reconhecer o que está sobre o terreno, e as nuvens de pontos nos permitem determinar com precisão as declividades e desníveis nesse terreno. A associação desses dois produtos nos confere potencial ímpar de



Figura 4. No alto, a modelagem de voo fotogramétrico sobre a nuvem de pontos resultantes da aerotriangulação; abaixo, o Modelo Digital de Terreno (MDT) derivado; e ao centro o ortofotomosaico da área, com resolução final de 5 cm para a cidade de São Lourenço do Sul, obtido pela equipe da FURG.

representar o comportamento da lâmina d'água ao inundar as áreas retratadas.

Porém, há um aspecto técnico específico que deve ser tratado com cuidado quando se opera com uma nuvem de pontos tridimensionais. Essas nuvens são obtidas por sensores Lidar ou por processamento de imagens aerofotográficas e nem sempre são bem compreendidas pelos profissionais que se utilizam desse produto. Em geral são listas de coordenadas dispostas em arquivos digitais de grande volume, onde cada ponto marcado representa uma posição na superfície do terreno, ou da face de objetos dispostos sobre ele (numa densidade de dezenas de pontos por metro quadrado).

Os pontos são resultantes do impacto de um feixe laser projetado desde o sensor, que está sendo transportado por um avião ou drone, e cada um deles carrega, entre outras informações, a altitude do terreno. Ou, como já informado, podem ser obtidos por processo de fotovarredura, que opera não por projeção

de feixes laser, mas por meio da modelagem matemática com reconhecimento automático de feições homólogas sobre fotos aéreas obtidas por câmeras digitais acopladas em aeronaves, tripuladas ou não.

Aqui, um detalhe importante: alguns parâmetros de medida das elevações sobre o terreno não são de simples entendimento, por mais que o pareçam ser. Qual a altitude de um ponto na frente de um prédio, no leito da rua de uma cidade? A primeira questão para responder essa pergunta é: em relação a que referencial? Em geral, todos entendem que o nível médio do mar é a referência universal para essas medidas. Mas onde se mede o nível médio do mar, ou seja, onde está a cota zero? Para isso, no Brasil, o IBGE mantém o denominado Datum Vertical (o marégrafo do Porto de Imbituba, em SC), e aproxima essa referência dos usuários através de uma rede física de marcos distribuída sobre todo o território nacional. Os dados dessa rede são divulgados no portal <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica.html>. Então, para que as nuvens de pontos possam ser adequadamente utilizadas em modelos de inundação é fundamental que todas as cotas de seus pontos estejam reduzidas a esse referencial, e isso exige algum esforço técnico e trabalho de campo.

No caso em tela, a alternativa utilizada para levar os dados para o referencial geoidal (Datum de Imbituba) foi a construção de um modelo estimativo de correção, calculado a partir de pontos de controle posicionados homogeneamente sobre o território, e onde foram dispostos alvos refletores. Na Figura 5 estão os alvos utilizados, e as posições em que foram implantados. Cada um desses alvos teve sua cota vertical determinada em relação ao nível do mar, e puderam ser reconhecidos na nuvem de pontos em função da alta intensidade de reflexão

do sinal laser pelos espelhos do prisma fixo no terreno. Ou seja, o parâmetro intensidade do feixe medido pelo sensor obrigatoriamente deve estar disponível, e não somente as coordenadas dos pontos. A Figura 6 exemplifica esse processo de reconhecimento numa seção da nuvem de pontos.

O resultado dessa operação de correção baseada no modelo empírico aplicado foi aferido por um conjunto de pontos de verificação, e o erro quadrático médio encontrado ao fim da validação foi 0,032 m.

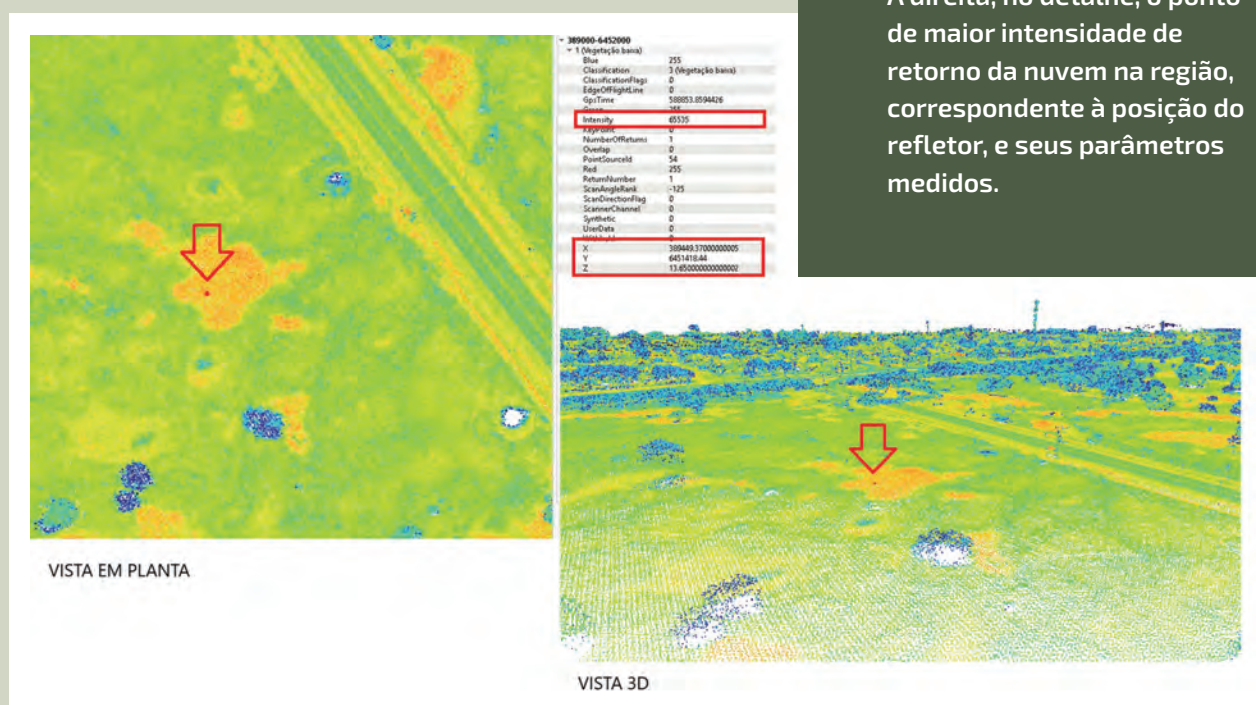
Compete ainda relatar uma das maiores dificuldades encontradas na aplicação dessa metodologia: a baixa disponibilidade de pontos de referência de nível da Rede Altimétrica de Alta Resolução do IBGE já citada. Essas referências são marcos geodésicos, normalmente materializados como um bloco de concreto rigidamente preso ao terreno, ou uma placa de bronze presa a monumentos históricos, nas áreas urbanas das cidades ou nas margens das rodovias. Originalmente, o IBGE e o Serviço Geográfico de Exército implantaram um grande número desses marcos precisos em quase todos os estados do Brasil. No município de Rio Grande, a Figura 7 apresenta alguns dos pontos dessa Rede Altimétrica de Alta Precisão, porém, observe-se, que aqueles sinalizados em vermelho não estão mais disponíveis, pois foram destruídos com a realização de obras de duplicação de estradas pelo próprio poder público. Essa não é uma realidade local, mas um processo que se reproduz em todo o país, ou seja, não há respeito à preservação desses marcos fundamentais, mesmo que estejam protegidos por lei, como vem sendo alertado pelo próprio IBGE (Rodrigues *et al.*, 2011).

Em função dessa restrição, as redes de nivelamento geométrico montadas para determinar a cota dos refletores ficaram



◀ Figura 5. Os refletores laser implantados, e a disposição dos pontos sobre o território de Rio Grande utilizados para composição de um modelo de correção geoidal local.

▼ Figura 6. À esquerda, a nuvem de pontos laser em vista 3D, nas imediações onde foi implantado um alvo refletor. À direita, no detalhe, o ponto de maior intensidade de retorno da nuvem na região, correspondente à posição do refletor, e seus parâmetros medidos.



evidentemente mais extensas, sendo que uma delas exigiu caminhamento de 34 km em operação de nivelamento e contranivelamento. Ou seja, os serviços de topografia e geodésia passam a exigir operações de maior porte, com aumento do investimento e extensão do tempo de resposta para a solução do problema.

A nuvem de pontos corrigida é então integrada para uma taxa amostral de um ponto para

cada 50x50 cm² do território, e dois produtos podem ser obtidos: (i) com os dados da nuvem completa, que permitirá gerar o denominado Modelo Digital de Elevações (MDE); (ii) com os dados da nuvem filtrados, mostrando somente pontos que impactaram sobre o solo, que entregará o Modelo Digital do Terreno (MDT).

Esse segundo produto retira das medidas pontos laser que impactaram no alto de prédios,

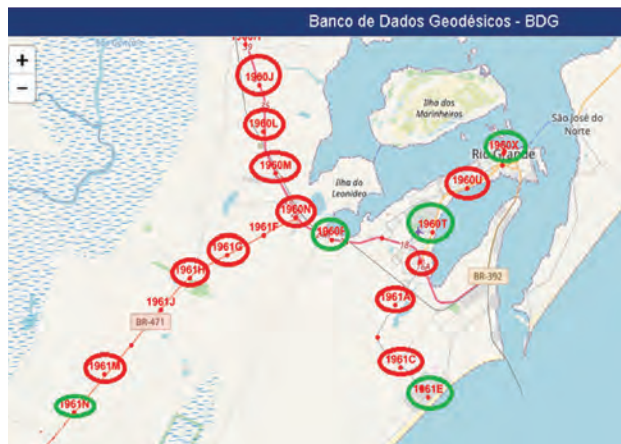


Figura 7. As RNs da Rede Geodésica Brasileira em Rio Grande. Em verde aquelas ainda existentes e válidas.

nas copas das árvores, nos veículos, e em quaisquer outros elementos que não estejam compatíveis com a superfície do solo exposto ou pavimentado². A Figura 8 ilustra esse dado original, enquanto a Figura 9 apresenta uma imagem do MDE de uma região da orla histórica da cidade de Rio Grande, que é o produto elementar utilizado para a modelagem das condições de inundação.



Figura 8. Imagem gerada com os dados da nuvem laser scanner reduzida ao referencial vertical do Serviço Geológico do Brasil (Marégrafo de Imbituba, SC).



Figura 9. Imagem do Modelo Digital de Elevações reduzido ao referencial vertical do SGB, no Centro de Rio Grande.

Ambos os modelos, MDE e MDT, podem ser usados para simulação de inundação e a diferença dos resultados estará na representação final do cenário. Se utilizado o MDT, a área inundada ficará contínua, como se o terreno fosse nu. Se utilizado o MDE a mancha será segmentada pelos prédios, que ficarão como ilhas. A Figura 10 mostra um exemplo dessa mancha calculada e representada com o uso do MDE.

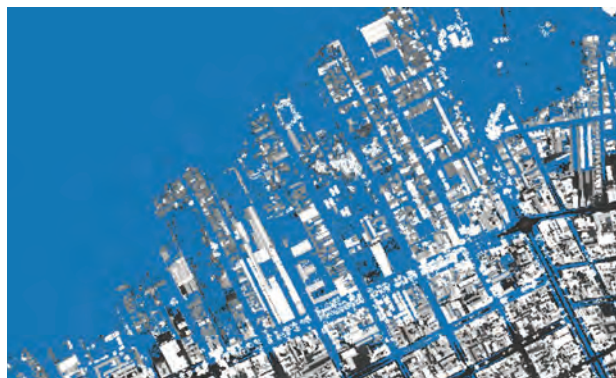


Figura 10. Um cenário de inundação calculado com o uso do MDE, ou seja, com a manutenção dos dados das edificações, arborização e outros objetos da paisagem. Nesse caso, a mancha de inundação circunda esses objetos, entregando um cenário mais realístico do evento.



Figura 11. O
Linígrafo do
CCMAR-FURG
operando
durante 7
dias/24 horas
com transmissão
de dados
telemétricos até
o servidor do
LTGEO-FURG.

Em relação ao modelo hidrodinâmico que simula os níveis (e correntes) em regiões costeiras, a escolha do sistema Open Telemac-Mascaret (www.opentelemac.org)³ para a Lagoa dos Patos e seu estuário deu-se há mais de 20 anos em função da sua capacidade de representar as complexidades geomorfológicas e hidrodinâmicas desse tipo de ambiente, garantindo a qualidade de suas previsões. Esse modelo foi implementado para a Lagoa dos Patos por Fernandes (2001), e instalado na FURG em 2002. Desde então, o modelo foi amplamente aplicado e extensivamente calibrado e validado para a Lagoa dos Patos e plataforma continental adjacente (Fernandes *et al.*, 2001, 2002, 2021; Marques *et al.*, 2009; Antônio *et al.*, 2020; Bitencourt *et al.*, 2020; Lisboa *et al.*, 2022; Franzen *et al.*, 2023). Através de uma iniciativa da Portos RS, em 2023 a versão do Modelo Telemac-3D foi atualizada para V8P2

no contexto do Programa de Monitoramento Ambiental Continuoado da Biota Aquática e Modelagem Hidrossedimentar da Hidrovia da Lagoa dos Patos, garantindo a robustez necessária para as simulações prognósticas realizadas durante o evento de enchente de maio de 2024.

3. Discussão de classe de solução – o Digital Twin Lagoa dos Patos (DT – Lagoa)

O conceito do Digital Twin Lagoa dos Patos (DT – Lagoa) está baseado em: (i) conjuntos de dados obtidos por redes de monitoramento meteorológico (ventos, precipitação), oceanográficos (de nível da água) e geodésicos (de território) combinados com (ii) um modelo numérico hidrodinâmico previamente configurado, calibrado e validado, (iii) um

modelo de inundação baseado em métodos de Inteligência Artificial ativado pela saída precisa do nível d'água em múltiplos pontos do modelo hidrodinâmico, (iv) um sistema de geração de mapas e plantas, e (v) um sistema de comunicação com a comunidade e forças de segurança, fornecendo uma réplica virtual do ambiente natural da Lagoa dos Patos e municípios às suas margens, o DT – Lagoa (Figs. 1 e 2). Especial enfoque será dado aos dados de nível e de território, enquanto dados de redes de monitoramento meteorológico serão obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), à Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul, e à Prefeitura Municipal de Porto Alegre.



3.1. A rede de monitoramento de nível da Lagoa dos Patos

Em face ao elevado custo dos linígrafos comerciais e às dificuldades associadas às leituras periódicas feitas por um observador, o

LTGEO-FURG desenvolveu um projeto de ensino que teve como objetivo efetuar a leitura por visão computacional de uma régua graduada em cm encravada em um corpo d'água. Esse sistema foi instalado no ano de 2023 e ficou conhecido por toda a comunidade Rio-Grandina por sua operação contínua durante o evento de maio de 2024, sendo denominado Linígrafo do CCMAR (Figs. 2 e 11), dado que estava implantado na Doca do Centro de Convívio dos Meninos do Mar, uma estrutura de ensino e extensão da FURG.

O protótipo é composto pelos seguintes elementos: uma régua em fibra, normalmente utilizada em operações de nivelamento geométrico, fixa rigidamente ao cais, em um ponto seguro e onde se garanta a estabilidade estrutural, ou seja, onde se avalie muito pouco provável o deslocamento da estrutura em relação à massa d'água; uma haste metálica rígida fixa horizontalmente no alto dessa régua, e em sua extremidade uma câmera digital posicionada e orientada para a régua; um sistema de aquisição de imagens, processamento da posição da linha d'água, da gravação do dado em memória interna e de sua transmissão por sinal 3G/4G, microprocessado e instalado no suporte da estação; um sistema de provisão de energia, redundante, com alimentação da rede (quando disponível), sobreposta à alimentação fotovoltaica e às baterias no break.

O experimento com esse instrumento foi considerado exitoso a ponto de estar sendo transferido para toda a extensão da Lagoa dos Patos em uma rede de monitoramento financiada pela Portos RS. Essa rede será composta por 12 dispositivos com esse conceito de visão computacional, e terá estações nas posições apresentadas na Figura 12. Os dados do dispositivo de Rio Grande (estação CCMAR) já fazem parte do Portal Hidro, integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – Snirh (<https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/>)

seriehistorica.aspx), e foram amplamente utilizados durante a inundação de maio de 2024.

3.2. O modelo hidrodinâmico

Embora o Modelo Telemac-3D venha sendo aplicado no Sul do Brasil nos últimos 20 anos, a enchente de maio de 2024 foi a primeira vez que esse modelo foi aplicado na forma prognóstica para prever a hidrodinâmica da Lagoa dos Patos. O modelo calculou o nível da água e as velocidades das correntes em intervalos de tempo de cinco dias (devido à confiabilidade da previsão dos ventos sobre a área), resultando em seis simulações ao longo de maio de 2024.

O domínio numérico deste estudo abrangeu a região entre 29,5° – 35,5°S e 48° – 54°W, incluindo a Lagoa dos Patos, seu estuário e uma área oceânica até 2.300 m de profundidade (Fig. 13A). Esse grande domínio computacional faz-se necessário para que condições de contorno de modelos de maior escala possam ser utilizadas. O domínio foi discretizado com uma grade computacional não estruturada que utiliza elementos finitos triangulares de tamanho variável (Fig. 13B) para garantir a adequada representação da linha de costa e das variações batimétricas. A grade numérica utilizada para o evento de enchente de maio de 2024 foi gerada pelo software BlueKenue (http://www.nrcnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue_kenue_index.html), e era composta por 52.098 nós (vértices dos triângulos para os quais o modelo resolve as equações e gera previsões) e sete níveis verticais Sigma.

As condições iniciais e de contorno do modelo hidrodinâmico abrangem: (a) dados do nível do mar e campos de velocidade obtidos pelo Sistema de Inversão de Marés OSU, que é implementado internamente no modelo Telemac-3D, fornecendo 33 componentes harmônicos de maré; (b) campos de salinidade e temperatura do

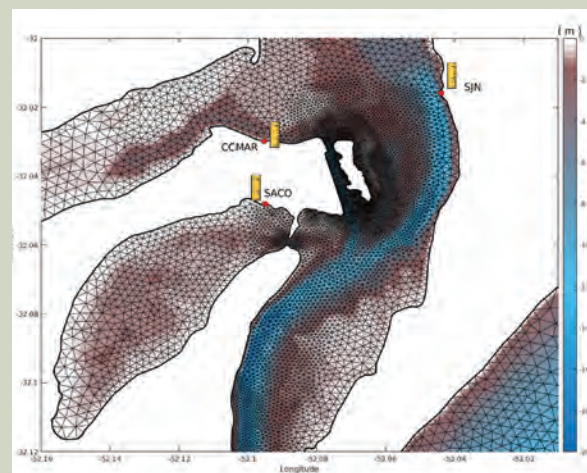
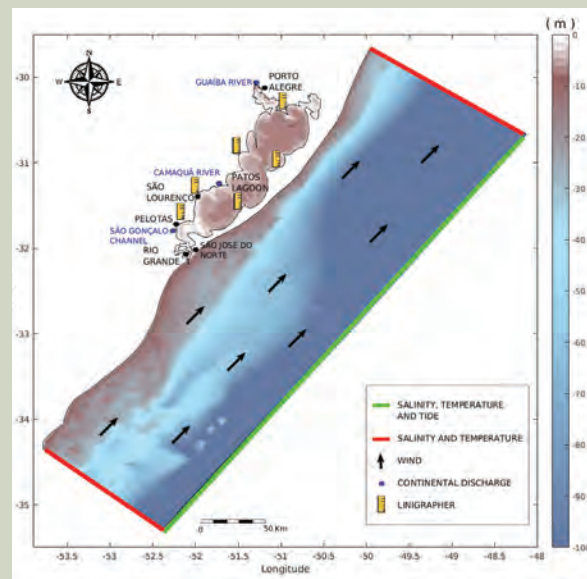


Figura 13. A) Lagoa dos Patos e o domínio computacional identificando o tipo e localização das condições de contorno prescritas para o Modelo Telemac – 3D. B) Zoom da área ao redor do município de Rio Grande acompanhado de ilustração da grade computacional de elementos finitos do modelo numérico. A escala de cores representa a batimetria da área. As réguas representam estações da Rede de Monitoramento do Nível da Lagoa dos Patos.

Projeto Global Hycom + NCODA (Modelo Híbrido de Coordenadas Oceânicas, <https://hycom.org>), com resolução temporal e espacial de 3 h e 0,080, respectivamente; c) dados de vento do ECMWF (Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo, <http://www.ecmwf.int>) ERA-Interim, com resolução temporal e espacial de 1 h e 11 km⁴, respectivamente; d) previsão da vazão dos principais afluentes (Rios Guaíba e Camaquã, Fig. 13A), fornecidos por modelo hidrológico de grandes bacias (Pontes *et al.*, 2017) para realizar a modelagem de vazão em toda a bacia hidrográfica (Lopes *et al.*, 2018; Giacomelli *et al.*, 2019)⁵. Para o Canal São Gonçalo (Fig. 13A) os dados foram fornecidos pela Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (<https://wp.ufpel.edu.br/alm/agencia>).

Embora o modelo Telemac-3D tenha sido amplamente aplicado e extensivamente calibrado e validado para a Lagoa dos Patos e plataforma continental adjacente (Fernandes *et al.*, 2002, 2021; Marques *et al.*, 2009; António *et al.*, 2020; Bitencourt *et al.*, 2020; Lisboa *et al.*, 2022; Franzen *et al.*, 2023), nova validação em tempo real foi realizada durante o evento de enchente de maio de 2024 com dados de nível nas estações CCMAR (Erro Médio Absoluto MAE + 0,18 m), Laranjal⁶ (MAE + 0,10 m) e São Lourenço do Sul⁷ (MAE + 0,09 m), indicando excelente reprodutibilidade em diferentes áreas do corpo lagunar (Fig. 14), como pode ser visto pela semelhança entre as linhas nos gráficos que representam os dados medidos (linha vermelha) e as previsões do modelo (linha azul). Outras métricas tradicionais de avaliação de performance de modelos hidrodinâmicos foram também consideradas (Tabela 1), e todas corroboram o excelente desempenho do modelo Telemac-3D para este estudo.

Neste estudo de caso para a cidade de Rio Grande, foi considerado o pico máximo do nível d'água observado no dia 16 de maio, conforme dados medidos na estação CCMar – FURG (Fig. 11), para

alimentar os diversos pontos do Modelo Digital de Elevação (Fig. 2C) com os níveis de água previstos pelo modelo hidrodinâmico e estabelecer as cotas de inundação na cidade de Rio Grande. A os níveis de água calculados pelo modelo hidrodinâmico (referência vertical da Marinha do Brasil) foi adicionado 1 m para nivelar com o nível de referência de Imbituba (o Datum Vertical Brasileiro). 1,90 m representa o limite do Cais do CCMar e valores > 1,90 m indicam inundação.

3.3. O modelo de inundação

A base de dados fundamental para a simulação de inundação é um Modelo Digital de Elevação apresentado para a cidade de Rio Grande nas Figuras 9 e 10. E nos casos de inundação em cidades na Planície Costeira às margens da Lagoa dos Patos, a água toma a cidade lentamente, num regime físico denominado laminar, ou seja, sem turbulência, sem arrasto ou velocidades de corrente significativas. Logo, conhecidos os parâmetros da variação vertical do nível da água na Lagoa dos Patos, um algoritmo básico pode ser utilizado para determinar com precisão as áreas afetadas nas cidades atingidas. O Comitê de Eventos Extremos da FURG, nesse caso, utilizou um algoritmo adaptado de um segmentador de imagens, desenvolvido a princípio como gerador de animações de impacto de enchentes. O método original consagrado há décadas é derivado de Beacher e Lantuéjoul (1979), e conhecido como *Watershed*, ou seja, método da bacia hidrográfica, por traçar um paralelo das imagens digitais com a topografia do terreno. A ideia é bastante simples e está ilustrada na Figura 15. Um conjunto de pontos posicionados exatamente na linha de orla do Modelo Digital de Terreno tem os valores de nível apurados no modelo hidrodinâmico da Lagoa dos Patos. A cada passo de modelagem um valor é tomado na série temporal do nível nesses pontos, e ocorre a propagação do sinal pela vizinhança a ele conectada.

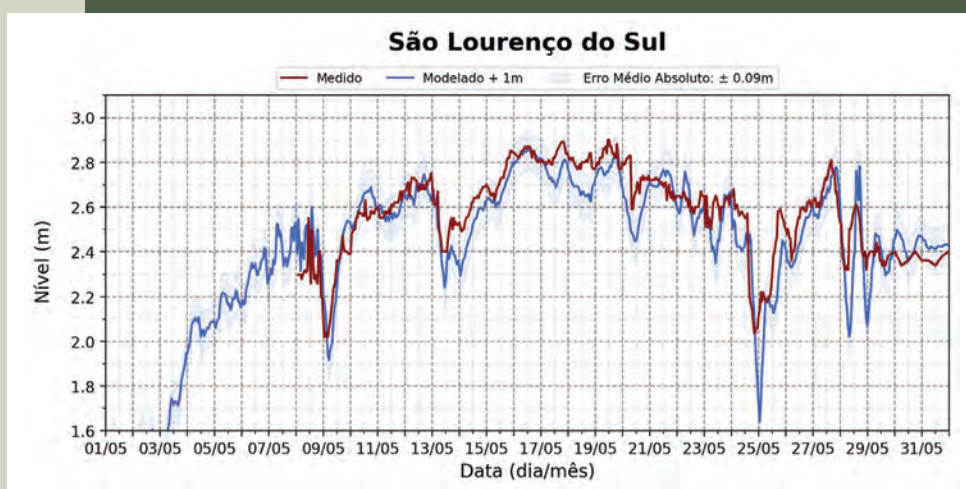
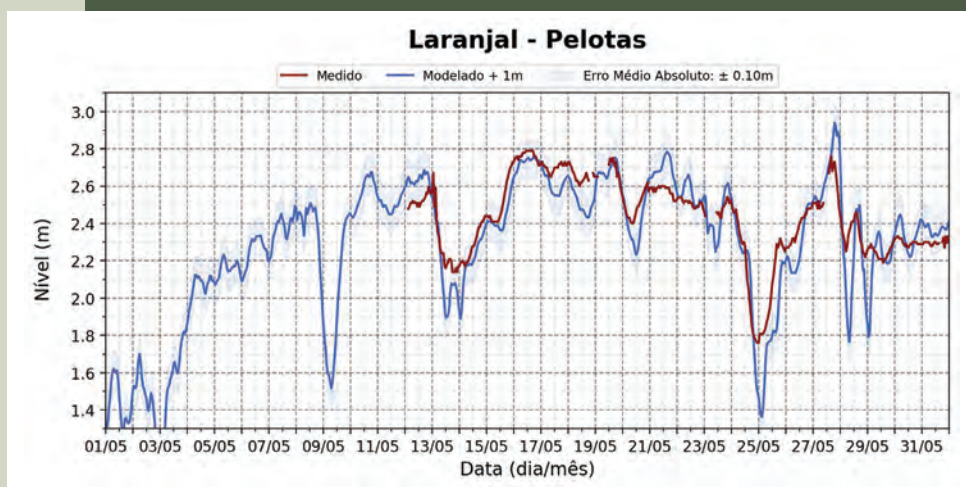
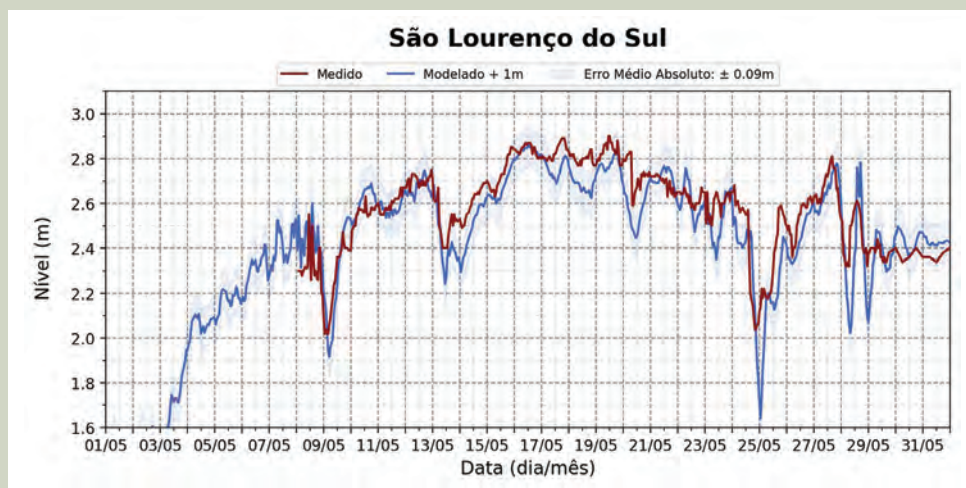


Figura 14. Dados de nível medidos (linha vermelha) e previsões do modelo hidrodinâmico (linha azul) nas estações A) CCMAR – Rio Grande, B) Laranjal – Pelotas e C) São Lourenço do Sul. O sombreado azul representa o Erro Médio Absoluto em cada caso.

	CCMAR	Laranjal	SLS
n	744	450	523
RMSE	0.28	0.14	0.12
Mape	0.10	0.04	0.04
Bias	0.06	-0.04	-0.05
Kendall	0.60	0.70	0.70

Tabela 1 – Métricas tradicionais utilizadas para a avaliação da performance do modelo hidrodinâmico nas estações CCMAR – Rio Grande, Laranjal – Pelotas e São Lourenço do Sul. n=número de observações.

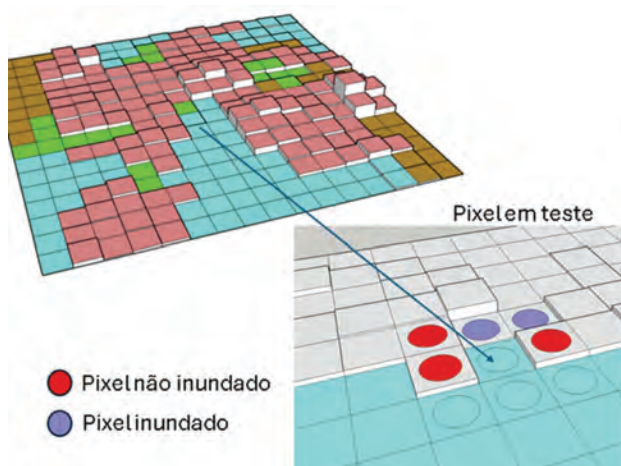


Figura 15. A lógica elementar do modelo de inundação, segundo um algoritmo Watershed. Pixels vizinhos com cotas iguais ou menores que o nível no pixel origem são marcados como inundados e se tornam nova origem. Os pixels com cotas maiores são desconsiderados.

A propagação do sinal é regida por um teste de elevação lógico e simples: o nível do terreno no ponto vizinho é menor ou igual ao nível excitado no ponto da orla? Se a resposta for positiva, suas coordenadas (x, y) são transferidas para uma tabela de registros alocada dinamicamente, em que estão presentes os pontos com status de alagado. Caso contrário, esse ponto não alimenta a tabela, e é mantido com suas propriedades originais. Esse processo é repetido até que mais nenhum ponto conectado seja detectado como alagado, ou seja, todos os pontos vizinhos testados estão acima do nível informado pelo modelo hidrodinâmico. Então essa tabela é percorrida sequencialmente, e na matriz imagem que representa o terreno todos os pontos com coordenadas registradas são colocados na cor correspondente ao alagamento.

Esse método seria suficiente para estimar as áreas alagadas num dado instante, nas hipóteses simplificadoras já descritas, não houvesse a possibilidade de transporte das massas d'água por

galerias e tubulações subterrâneas. Os dutos de drenagem das ruas da cidade são estendidos até as margens do corpo d'água receptor. Portanto, quando a água sobe acima da cota da porção superior desses dutos, e ao mesmo tempo, se essa cota é maior que a das bocas de lobo nas sargetas das ruas, um efeito de vasos comunicantes fará a água sair pelos mesmos elementos utilizados para coletar a água das chuvas. Então esses elementos devem estar bem representados para que o cenário real seja reproduzido. A estratégia utilizada foi gerar uma matriz das mesmas dimensões daquela que representa o terreno (MDT ou MDE), inicializada com todos os elementos zero. Essa matriz funciona como um plano paralelo ao MDT, e é utilizada para representar conexões subterrâneas (Figura 16).

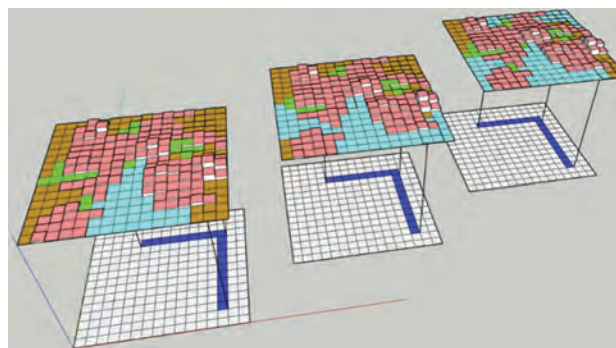


Figura 16. Representação esquemática do registro matricial das conexões subterrâneas existentes, responsáveis pela drenagem do terreno, e que se transformam em elementos de inundação quando o nível do receptor sobe.

Pois toda vez que, no processamento de expansão da mancha de inundação, pixel a pixel, um ponto correspondente à saída de um duto for atingido (ponto extremo da linha azul, no exemplo), então os pontos da mesma linha onde se tem uma entrada de boca de lobo terão suas cotas aferidas no modelo do terreno. E se essa cota for menor que o nível do corpo d'água naquele tempo de simulação, ele será incluído na

tabela de pontos inundados, tornando-se uma nova origem de alagamento. A Figura 17 expressa a diferença da inclusão desse processo na simulação de inundação em um ponto na região do Hospital Universitário da FURG, em Rio Grande. Observe-se que, mesmo com o leito da rua limite da orla sem água, as vias conectas aos pontos onde se tem entrada de bocas de lobo inundaram.

O resultado final do processamento pode ser visualizado sob diversos formatos, entre os quais, em mapas planos mostrando a extensão da mancha. Porém, observamos que detendo precisamente a cota do terreno nas posições alagadas, e sabendo-se o valor do nível da água simulado na orla (entregue pelo modelo hidrodinâmico), com uma operação aritmética simples (subtraindo um valor do outro), podemos obter o valor da espessura da lâmina d'água em todos os pontos inundados. E isso foi realizado como uma saída padrão, onde a representação numa escala de cores específica permitiu a divulgação à comunidade e aos agentes de segurança desse parâmetro fundamental, a altura da água sobre o terreno em cada ponto da cidade inundada (Figura 18).

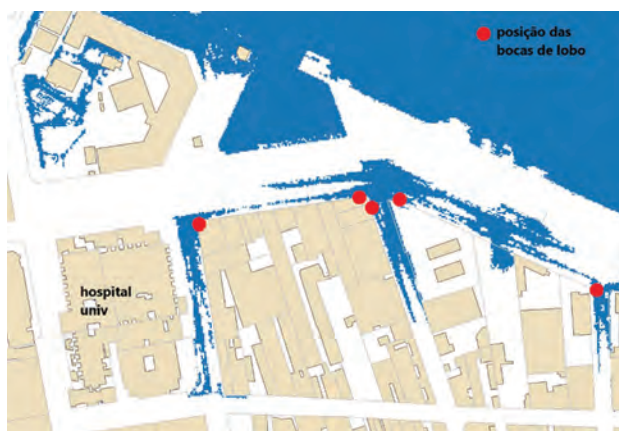


Figura 17. O efeito da inundação considerando o transporte de água pela rede subterrânea. Nessa simulação o nível da água no estuário estaria 0.75 cm acima da cota inicial, suposta como a cota da pedra do cais na doca do CCMAR.

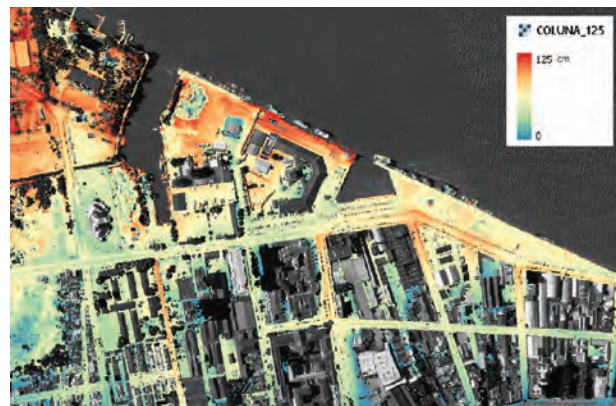


Figura 18. Para uma cota de 1,25 metro de elevação do nível do estuário (sendo zero o nível da pedra do cais do CCMAR), as cores da imagem, conforme a legenda, indicam a altura da lâmina d'água nas ruas da cidade.

Essa dinâmica pode ser reproduzida para geração de mapas temáticos importantes, como os de segurança de tráfego para diferentes viaturas, já citado anteriormente nesse artigo. Neste caso, a equipe de produção cartográfica recebeu uma tabela com a capacidade de diversas classes de veículos circular, com alguma segurança em áreas inundadas. Considerava-se seguro para um automóvel de passeio circular com até 30 cm de lâmina de água, uma ambulância com até 35 cm, uma caminhonete sem preparação especial até 45 cm e uma caminhonete com snorkel até 55 cm. Acima desse valor, para qualquer tipo de veículo sobre rodas, foi considerado impróprio o deslocamento. Então foram gerados mapas com as ruas e as classes de veículos que poderiam circular sobre elas em diversos cenários, relacionados ao nível que a lagoa atingiria ao longo do evento. E assim rotas seguras para deslocamento das equipes de atendimento à população puderam ser traçadas (Figura 19).

Também numa lógica de métrica inversa, pôde-se informar aos agentes portuários, sempre que demandado, a distância vertical medida



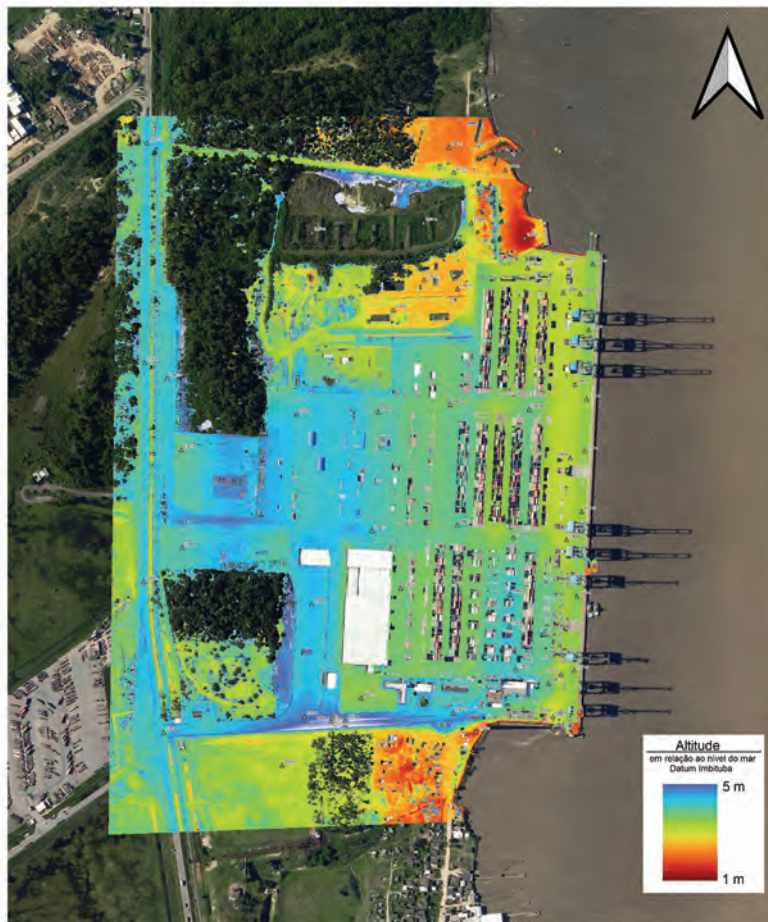
do nível estimado de subida das águas até as estruturas de atracação, ou áreas de manobra, de estacionamento ou armazenamento nos diversos terminais do Porto do Rio Grande. Esses produtos foram denominados Mapas de Segurança à Inundação. A Figura 20 ilustra esse produto para o Terminal de Containers do Porto do Rio Grande. Essa metodologia aplicada pela FURG durante o evento extremo de inundação de maio de 2024, foi premiada na categoria artigo técnico-científico do Prêmio Antaq 2024 (Fernandes & Gonçalves, 2024) com o trabalho intitulado *Digital Twin Porto do Rio Grande (DT – Porto): construindo prevenção e resiliência*. No contexto desse estudo, o Porto Organizado do Rio Grande foi promovido a um porto inteligente que utiliza sistemas de monitoramento e previsão de última geração para garantir uma operação segura e resiliente durante eventos extremos, contribuindo para a segurança da sociedade, do meio ambiente e da economia da região.

4. Proposta de política pública – generalização para outras regiões

Apesar da existência de diferentes métodos e tecnologias de monitoramento e previsão relacionadas à avaliação e mitigação de riscos de eventos extremos de inundação, é importante assegurar que algumas especificidades sejam atendidas de forma a garantir a qualidade dos resultados obtidos e a geração de políticas públicas efetivas ao enfrentamento desses eventos.

Sistemas para monitoramento de nível dos corpos e cursos d'água devem necessariamente possuir características físicas robustas, sendo colocados sob estruturas altamente resistentes e em posições onde se possa confiar que não serão inundados ou arrastados. Devem utilizar técnica de medida precisa e invariável, e os dados medidos instantaneamente devem estar em condições de

TECON - PORTO DO RIO GRANDE PLANTA ALTIMÉTRICA



Processamento e Composição
LTGEO/C3/FURG



Imagem altimétrica Lidar - Filtro para pontos sobre o terreno
Densidade amostral 16 pontos por m²
Imagem de fundo: aerofotogramétrica 30 cm, RGB

Dados de nível no Canal:
Nível médio medido pelo mareógrafo do SIMCOSTA (Malhas da Barra) = 1,40 metros
Nível máximo atingido durante a inundação, medido no mareógrafo do SIMCOSTA = 2,62 m (em 16/05/2024)
Nível máximo atingido durante a inundação, medido no linógrafo do COHAR = 3,02 m (em 16/05/2024)

Figura 20. Mapa de Segurança à Inundação do Terminal de Containers do Porto do Rio Grande, na condição de máxima elevação do canal durante a enchente (16 maio 2024).

ser transmitidos até serviços de armazenamento e divulgação. Neste, porém, deve-se utilizar meios redundantes de comunicação digital, seja por uso de canais de internet sobre dados móveis de serviços de telefonia celular, seja por dotação de comunicação proximal utilizando sistema LoRa (por exemplo), ou, se possível, integrando sistema de internet por satélite, especialmente nos pontos mais críticos e remotos. Importante também citar a importância de utilizar sistemas homologados

e recomendados por órgãos técnicos de alta credibilidade, tais como a ANA (Agência Nacional de Águas de Saneamento Básico) e o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), reservando cautela em relação a sistemas que não geram dados instantâneos confiáveis ou que modifiquem o dado medido ao longo do tempo.

Em relação à modelagem hidrodinâmica de níveis (e correntes), um dos aspectos mais

importantes diz respeito à escolha do modelo numérico a ser utilizado, uma vez que os ambientes costeiros sujeitos aos impactos dos eventos extremos usualmente estão localizados em regiões estuarinas de elevada complexidade geomorfológica e hidrodinâmica. Em relação à geomorfologia, é necessário que o modelo escolhido seja capaz de representar as variações batimétricas e de linha de costa de forma semelhante à realidade, pois estas são determinantes para a adequada previsão da hidrodinâmica do ambiente. Nesse contexto, os modelos que utilizam o método dos elementos finitos para a discretização horizontal do domínio com base em grades não estruturadas representam a melhor opção. Por outro lado, a adequada representação da hidrodinâmica dessas regiões, que usualmente possuem fluxos longitudinais bidirecionais e também fluxos transversais, só pode ser obtida por meio do uso de modelos hidrodinâmicos tridimensionais, e considerando um número adequado de camadas na discretização vertical do domínio.

Uma vez escolhido o modelo numérico, é essencial que ele seja extensivamente calibrado e validado para a região de estudo a partir da comparação dos resultados do modelo (nível, correntes, salinidade, maré) com dados ambientais medidos em campo para o mesmo período, e a apresentação de métricas que assegurem a capacidade do modelo de reproduzir o comportamento desses ambientes. O exercício de calibração usualmente envolve dezenas de simulações e deverá ser executado para um período específico para o qual existam medições e envolver a investigação da resposta do modelo à variação dos principais parâmetros físicos considerados na simulação desse período, como a lei de fricção com o fundo, o coeficiente de fricção, os coeficientes de turbulência horizontal e vertical, e o coeficiente de influência do vento. Uma vez determinado o conjunto de parâmetros físicos que melhor reproduz os dados medidos

naquele período, ele deverá ser aplicado no exercício de validação do modelo, que consiste na simulação de outro período para o qual existam medições de parâmetros ambientais e posterior avaliação dos resultados pelas métricas tradicionais.

Importante destacar que as simulações de validação do modelo deverão ser realizadas por períodos longos o suficiente para representar a diversidade de situações meteoceanográficas que controlam a hidrodinâmica do ambiente costeiro investigado, como a influência da maré (mínimo de dois meses de simulação), a variabilidade da descarga (simulação de situações de alta e baixa descarga e/ou que representem a variabilidade sazonal da mesma), a variabilidade do vento (simulações de situações de ventos predominantes na região e/ou que representem a sua variabilidade sazonal). Além disso, ambientes costeiros de grande dimensão requerem que a validação do modelo seja realizada com ampla representatividade espacial, ou seja, em pontos ao longo da extensão espacial do ambiente e representativos de diferentes condições hidrodinâmicas.

Atenção especial também deve ser dada à comparação de dados medidos de nível com resultados de modelos, uma vez que essa variável ambiental possui níveis de referência diferentes em cada contexto. As previsões feitas pelos modelos numéricos usualmente estão referenciadas ao Nível de Referência Vertical da Marinha do Brasil, enquanto as medições de nível estão referenciadas ao Datum Vertical Brasileiro (em Imbituba). No estudo de caso deste trabalho, por exemplo, às previsões do modelo foi adicionado 1 m para propiciar a amarração entre os referenciais.

Existe uma variedade de parâmetros estatísticos que são usualmente utilizados para demonstrar a capacidade dos modelos

numéricos hidrodinâmicos de reproduzir a realidade do ambiente, e essa comprovação é uma etapa fundamental para a avaliação da qualidade das previsões feitas. Williams; Esteves (2017) apresentam uma revisão sobre as métricas recomendadas para a calibração e validação de modelos numéricos aplicados a regiões estuarinas e de plataforma continental, recomendando índices de qualidade para acurácia do modelo (Raiz do Erro Médio Quadrático, RMSE), bias (Bias Médio), correlação (Coeficiente de Pearson), skill (Brier Skill score [BSS]), e concordância (Scatter Index).

Em relação a modelos de inundação, é importante considerar que o modelo aqui utilizado apresentou altíssima acurácia quando comparado com a real inundação observada, e se aplica plenamente às planícies costeiras. Para áreas em que os regimes turbulentos de escoamento predominem, especialmente nas situações onde o transporte de massa territorial ocorre, alternativas bem mais complexas são necessárias. De forma geral, entretanto, o modelo de inundação aqui apresentado pode ser considerado um método simples, que pode ser reproduzido em outros locais do Brasil e do mundo.

5. Conclusão

Diante das projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de que o permanente aquecimento global vai intensificar ainda mais a severidade e frequência dos eventos extremos, tais como ondas de calor e chuvas e estiagens intensas, torna-se imperativo que o poder público compreenda a origem e os impactos desses eventos e desenvolva instrumentos eficazes para prever e mitigar os efeitos de futuros desastres. A principal contribuição deste trabalho é apresentar o conceito do Digital Twin Lagoa dos Patos (DT – Lagoa) com nível de detalhamento suficiente para adaptação e replicação nos

mais diversos ambientes do território brasileiro. Tal ferramenta, pelo seu potencial analítico e preditivo, servirá de subsídio à tomada de decisões quanto às políticas públicas necessárias para a prevenção e mitigação dos impactos de eventos extremos nas regiões costeiras. Isso, em razão da evidente correlação verificada entre a magnitude dos impactos do desastre de maio de 2024 no Rio Grande do Sul e a falta de políticas públicas efetivas de prevenção e resiliência no enfrentamento de eventos extremos.

Importante destacar que o sucesso da atuação da FURG no contexto da enchente de maio de 2024, em parceria com outras IESs, foi construído com base em dados e ferramentas adquiridos e consolidados ao longo de décadas de trabalho, que por esse motivo estavam prontos para ser mobilizados quando demandado pela sociedade e pelas forças de segurança da região. Esse modelo de integração entre a academia e as forças de segurança deve ser replicado em eventos futuros, e em outras regiões do Brasil, garantindo a segurança das comunidades que vivem em regiões costeiras com custos relativamente baixos para o país. Particularmente na FURG, o fortalecimento dessa relação entre a academia e a sociedade, associado ao planejamento de ações de prevenção e resiliência, tem sido prioridade com a consolidação do Ciex – Centro Interinstitucional de Observação e Previsão de Eventos Extremos.

Além disso, com o estudo de caso da condição de inundação de maio de 2024 na cidade de Rio Grande, fica evidente a necessidade da institucionalidade dos procedimentos em diferentes níveis, promovendo uma integração orgânica e sistêmica entre os níveis federal, estadual e municipal. Dentro desse contexto, o estabelecimento de centros regionais subsidiados pelo conhecimento de IES no enfrentamento dos impactos de eventos extremos, bem como na definição de estratégias de prevenção, mitigação e resiliência nas regiões costeiras,

é fundamental. Esses centros regionais de monitoramento e previsão terão o papel essencial de gerar informações qualificadas, com alto nível de detalhamento e precisão, para as forças de segurança e defesas civis municipais, facilitando a emissão de avisos e alertas para a população e, também, a definição de estratégias de ação para o resgate e preservação da vida e do patrimônio. O funcionamento destes centros regionais, entretanto, deverá acontecer de forma integrada com os centros estaduais e nacionais, visando ao estabelecimento de políticas públicas de caráter abrangente e ancoradas em sistemas de monitoramento e previsão, para adaptação às mudanças climáticas e aos eventos extremos.

¹ O instrumental apresentado corresponde ao acervo técnico da empresa Hiparc Geotecnologia, vencedora do certame licitatório de Rio Grande, sob financiamento do PMAT BNDES.

² Essa informação de classe é obtida na fase primária de processamento do dado Lidar, por rotinas que operam o dado bruto e atribuem um código a cada ponto consistido. Esse código está disponível no formato .las (LAS Specification 1.4- R15, ASPRS, 2011, https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf), em que os dados são entregues e são acessíveis por leitura direta, utilizando as funções da biblioteca Laspy (2022).

³ O sistema Open Telemac-Mascaret (www.opentelemac.org) é um conjunto integrado de modelos numéricos para o estudo de fluxos de superfície livre. O Telemac-3D resolve as equações promedias de Navier-Stokes e considera as aproximações de Boussinesq e Hidrostática (Hervouet, 2007; Villaret et al., 2013), e está baseado no método dos elementos finitos, permitindo um alto refinamento da grade numérica em locais de interesse no domínio. As coordenadas Sigma são usadas para discretização vertical, permitindo uma representação precisa de gradientes batimétricos complexos e da morfologia de fundo.

⁴ Previsão de velocidade e direção do vento fornecida a cada cinco dias pela empresa Rhama Analysis.

⁵ Previsão de vazão fornecida pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS).

⁶ Hidrosens – Universidade Federal de Pelotas (UFPEL).

⁷ Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Referências

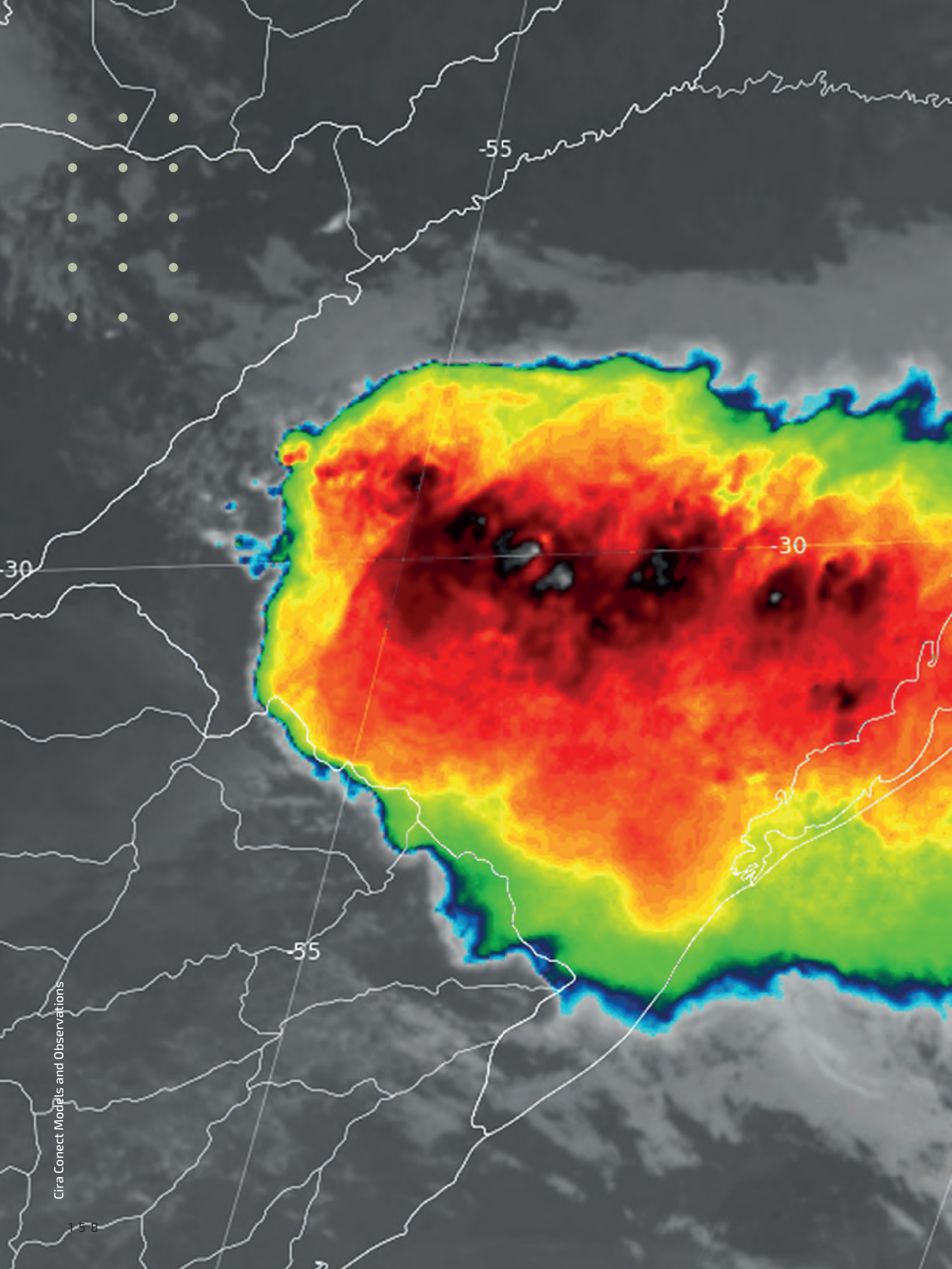
- ANTÔNIO, M. H.; FERNANDES, E. H.; MUELBERT, J. H. Impact of jetty configuration changes on the hydrodynamics of the sub-tropical Patos Lagoon estuary, Brazil. *Water*, 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12113197>.
- BEUCHER, Serge; LANTUÉJOL, Christian. *Use of watersheds in contour detection*. Conference paper, 1979. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/230837989>.
- BITENCOURT, I. P. et al. Spatio-temporal variability of suspended sediment concentrations in a shallow and turbid lagoon. *Journal of Marine Systems*, 212, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103454>.
- COLLISCHONN, W. et al. Unprecedented April-May 2024 rain-fall in South Brazil sets new record. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420240088>.
- COLLISCHONN, W. et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2024.
- FERNANDES, E. H. *Modelling the hydrodynamics of Patos Lagoon, Brazil*. PhDthesis, University of Plymouth, England, 2011.
- FERNANDES, E. H.; DYER, K. R.; NIENCHESKI, I. F. H. Calibration and validation of the Telemac-2d model to the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research*, 34, 2001, p. 470-488.
- FERNANDES, E. H. et al. The Patos lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, 22, 2002, p. 1699-1713. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00033-X).
- FERNANDES, E. H. et al. Dispersion plumes in open ocean disposal sites of dredged sediment. *Water*, 13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13060808>.
- FERNANDES, E. H.; GONÇALVES, G. *Digital Twin Porto do Rio Grande (DT – Porto): construindo prevenção e resiliência*. Prêmio Antaq 2024 – categoria Artigo Técnico-Científico (3º lugar).
- FRANZEN, M. O. et al. Influence of long jetties on estuarine and coastal hydrodynamics in a microtidal estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 59, 102809, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102809>.
- GIACOMELLI, I. et al. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 24-28 de novembro de 2019. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2019, p. 2318-0358.
- HERVOUET, J. M. *Hydrodynamics of free surface flows: modeling with the Finite Element Method*. Chichester, UK: Wiley, 2007.
- IPCC. *Climate change 1995: contribution of Working Group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.
- IPCC. *Climate change 2001: the scientific basis*. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press; New York, USA, 2001.
- IPCC. Sections. *Climate change 2023: synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023, p. 35-115. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>.
- LASPY. *Laspy: Python Library for Lidar Las/LazIO*. 2022. Disponível em: <https://laspy.readthedocs.io/en/latest/#>.

- LISBOA, P.V. *et al.* Coastal plumes contribution to the suspended sediment transport in the Southwest Atlantic inner continental shelf. *Journal of Marine Systems*, 236, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103796>.
- LOPES, V. A. R. *et al.* A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. *Journal of Hydrology*, 565, 2018, p. 177-196. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.011>.
- MARQUES, W. C. *et al.* Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, 29, 2009, p. 556-571. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.022>.
- MACÊDO, R. J. A. *et al.* Digital technologies for environmental sustainability. Ifip General Assembly, e publication, Ifip, 2024. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.52545/2-7>.
- MARENGO, J. A. *et al.* O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, 38 (112), 2024.
- PIAS, M. R. *et al.* Força-tarefa da Sociedade Brasileira de Computação (SBC): Digital Twin BR – a computação a serviço do planeta. *Computação Brasil*, 1(50), 2023, p. 39-45. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/compbr.2023.50.3926>.
- PIAS, M.; MACÊDO, J. A. (2022). *Sociedade Brasileira de Computação (SBC). Tecnologias digitais para o meio ambiente: Manifesto SBC*. Coord. Marcelo Rita Pias e Raimundo José de Araújo Macêdo. Porto Alegre: SBC, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/sbc.rt.2022.07.01>.
- PILLAI, U. P. A. *et al.* A Digital Twin modelling framework for the assessment of seagrass nature based solutions against storm surges. *Science of the Total Environment*, 847, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157603>.
- PILLAR, V.; OVERBECK, G. Learning from a climate disaster: the catastrophic floods in Southern Brazil. *Science*, v. 385 (6713), 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1126/science.adr835>.
- PONTES, P.R. M. *et al.* MGb-iPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open-source gis. *Environmental Modelling & Software*, 94, 2017, p. 1-20. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.
- RODRIGUES, A. C. *et al.* Manutenção física dos marcos do sistema geodésico brasileiro. XX Congresso Brasileiro de Cartografia. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica, 2011.
- VILLARET, C. *et al.* Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Computational Geosciences*, 53, 2013, p. 105-113. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.004>.
- VOOSEN, P. Europe builds "Digital Twin" of Earth to hone climate forecasts. *Science*, 370, 2020, p. 16-17. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.370.6512>.
- WILLIAMS, J. J.; ESTEVES, L. S. Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries. *Advances in Civil Engineering*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/5251902>.

Equipe de trabalho

Glauber Acunha Gonçalves
Professor associado, Centro de Ciências Computacionais, FURG
Doutor em Ciências Geodésicas pela UFPR

Elisa Helena Leão Fernandes
Professora titular, Instituto de Oceanografia, FURG
Doutora em Marine Science, University Of Plymouth, 2001





Projeto integrado de monitoramento e previsão climática, hidrológica e geotécnica para pequenas bacias hidrográficas

VAGNER ANABOR
DANIEL GUSTAVO PICCILLI ALLASIA
MAGNOS BARONI



RESUMO

Apresentar-se-á uma análise de políticas públicas e gestão de desastres no Rio Grande do Sul, focando no evento climático de abril-maio de 2024 que causou chuvas torrenciais e enchentes severas, impactando a infraestrutura, mobilidade e segurança. O estado, já vulnerável a extremos como secas e vendavais, evidenciou a fragilidade de pequenas bacias hidrográficas, cuja falta de monitoramento prejudicou alertas e respostas. A catástrofe resultou no colapso de pelo menos 1.320 pontes e mais de 14 mil escorregamentos de taludes e encostas, evidenciando desafios na previsão hidrometeorológica e na fragmentação dos sistemas de monitoramento brasileiros. Propõem-se estratégias como fortalecimento de redes climáticas, alertas precoces, infraestruturas resilientes e governança integrada entre os setores público e privado. Destaca-se a experiência da UFSM na previsão de riscos para pequenas bacias, com modelagem hidrológica, mapeamento de áreas vulneráveis e capacitação de agentes locais. O documento enfatiza a necessidade de políticas que integrem sistemas de monitoramento, inspiradas em metodologias internacionalmente reconhecidas, visando aprimorar respostas a futuros desastres.



Imagem fornecida pelo autor

Ponte colapsada em pequena bacia, na cidade de Quevedos.

1. Introdução

O maior desastre climático da história recente brasileira foi causado por um sistema de bloqueio atmosférico no Oceano Pacífico que criou uma frente estacionária que, por sua vez, produziu tempestades contínuas sobre a região central do Rio Grande do Sul entre os dias 29 de abril e 5 de maio, com um segundo evento de chuva intensa na semana subsequente. Esse evento gerou acumulados de chuva entre 465 e 600 mm na bacia do Rio Jacuí, com taxas de até 108 mm/h (Anabor, 2024). Em seguida, o segundo evento produziu precipitações de 500 a 1000 mm, chegando a 1.200 mm em 30 dias,

cerca de dois terços da média anual de chuva (Tassi *et al.*, 2024; Marengo *et al.*, 2024). A Figura 1 mostra um recorte do histórico atual das precipitações no Sul do Brasil, comparando os acumulados entre 1991 e 2020 e o acumulado do mês de maio de 2024.

No entanto, essa não foi uma ocorrência isolada, pois o Rio Grande do Sul apresenta frequentes eventos meteorológicos extremos, como cheias e secas (ANA, 2013). Na primavera e no verão, são comuns tempestades severas com granizo, enchentes, vendavais e tornados, que afetam os ciclos hidrológicos regionais (Ramussen *et al.*, 2013; Zipser *et al.*, 2006; Rasesa *et al.*, 2018; Anabor *et al.*, 2008). O evento de maio de 2024

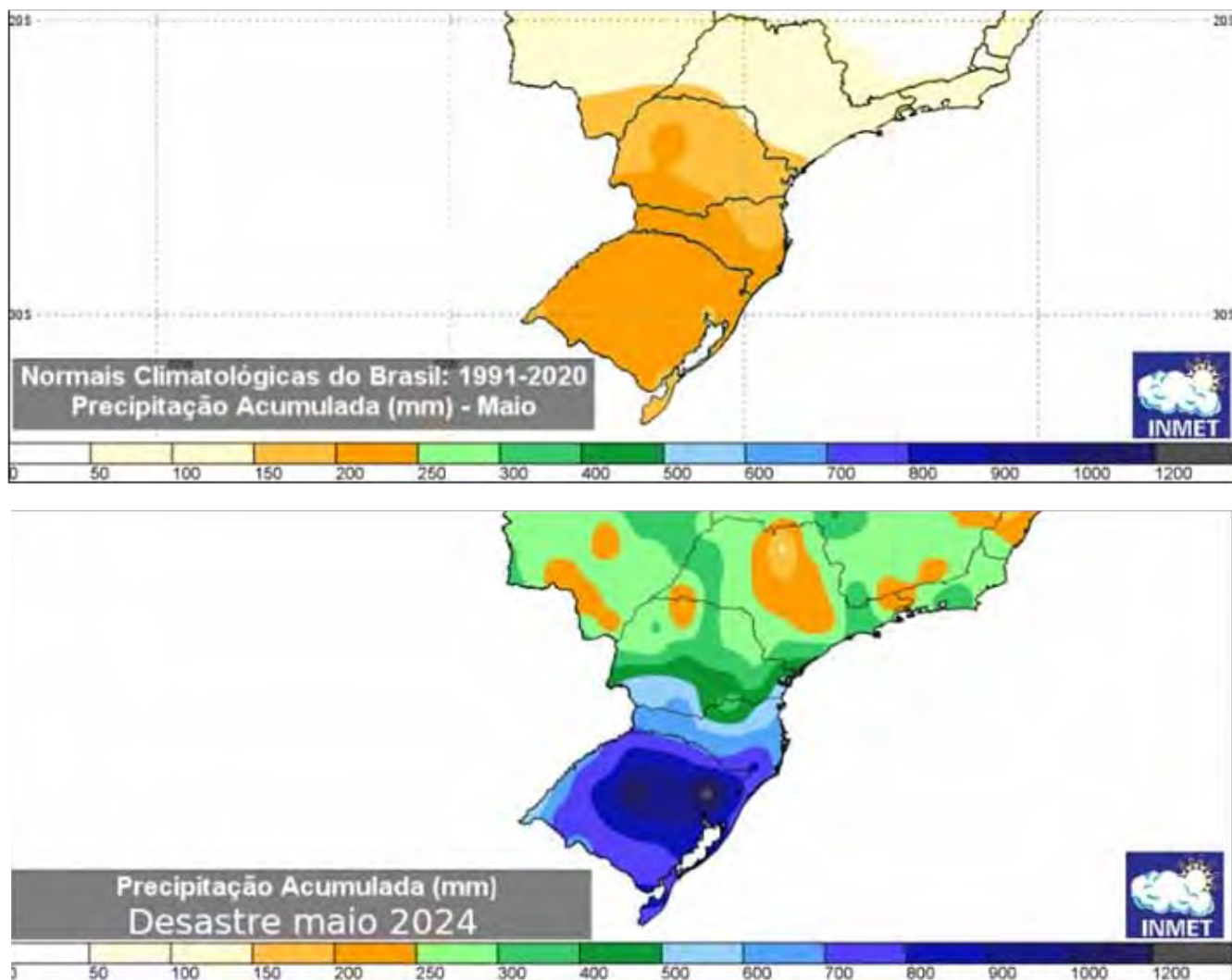


Figura 1. Histórico atual das precipitações no Sul do Brasil. (a) Acumulados entre 1991 e 2020 e (b) Acumulados em maio de 2024. Referência. os autores, a partir de dados do Inmet

foi uma anomalia tardia no final do outono, mas estava dentro das previsões dos cientistas, considerando que eventos climáticos extremos têm se intensificado no Brasil e globalmente nos últimos anos, conforme documentado pelo IPCC (2023). Em particular, no RS, vêm se alternando anos de inundações e secas.

A enchente extrema causou severos impactos sociais, ambientais e econômicos. Especificamente em obras de infraestrutura, foram afetadas inúmeras rodovias e estradas, criando bloqueios totais ou parciais, devido a deslizamentos, queda

de pontes ou alagamentos, alterando essa rede de conexões e impedindo o direito básico de ir e vir da população. O mapeamento das cicatrizes de escorregamentos identificou mais de 14 mil cicatrizes e 15 mil pontos de ruptura de talude (Cemaden, 2024, Nasa, 2024; Andrades Filho *et al.*, 2024). Comparando a densidade das cicatrizes e a mancha de inundação em relação à distribuição espacial das chuvas, os aglomerados de alta densidade de cicatrizes coincidem com áreas de maiores totais de precipitação (Figura 2) e que, por sua vez, coincide com as cabeceiras das grandes bacias na região da Serra Gaúcha ou no Rebordo do

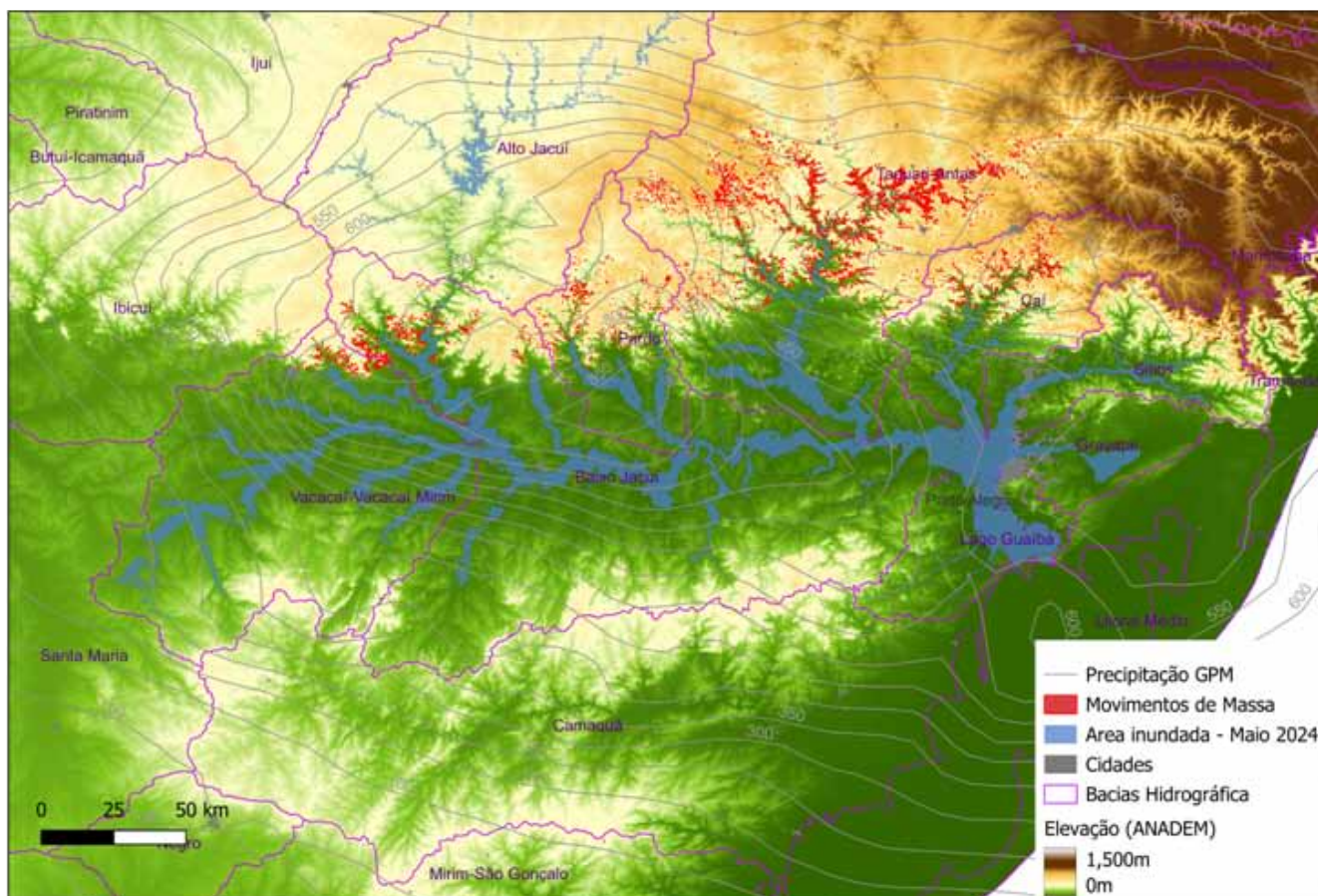


Figura 2. Mancha de inundação e cicatrizes de escorregamento documentadas por sensoriamento remoto com base em Possanti et al. (2024) e Cemaden (2024) sobrepostas à precipitação acumulada ao longo de 29 de abril a 2 de maio (com base em Tassi et al. 2024)

Planalto, ou seja, nas menores áreas de captação (bacias) e com as maiores declividades.

2. As pequenas bacias

Para a gestão desses eventos extremos, diversos organismos analisam o que ocorre nas bacias hidrográficas. As bacias são áreas de captação das chuvas que se transformam em elevadas vazões, que podem causar desastres como inundações e deslizamentos. O evento de inundação ocorrido causou o colapso de mais de 1.320 pontes no estado do RS (Boni, 2024).

Conforme mostrado na Figura 3, o Rio Grande do Sul foi dividido em bacias hidrográficas, sendo que as maiores incluem Taquari-Antas, Guaíba

e Jacuí. Uma questão importante com relação ao tamanho da bacia, é a não linearidade no comportamento das vazões, que é um reflexo de sua complexidade intrínseca e das interações dinâmicas entre diversos fatores, como o clima, o solo, a vegetação, o relevo e as atividades humanas. Essa característica implica que as relações entre os parâmetros hidrológicos em diferentes pontos da bacia não seguem proporções constantes, tornando desafiadora a extrapolação de valores entre bacias de diferentes tamanhos ou mesmo entre sub-bacias de uma mesma área. Por exemplo, bacias menores podem ser mais influenciadas por eventos locais, como tempestades intensas, enquanto bacias maiores tendem a apresentar um efeito amortecido (suavizado), devido ao somatório de diferentes contribuições espaciais



Figura 3. Bacias e sub-bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul

Fonte: Sema (2002).

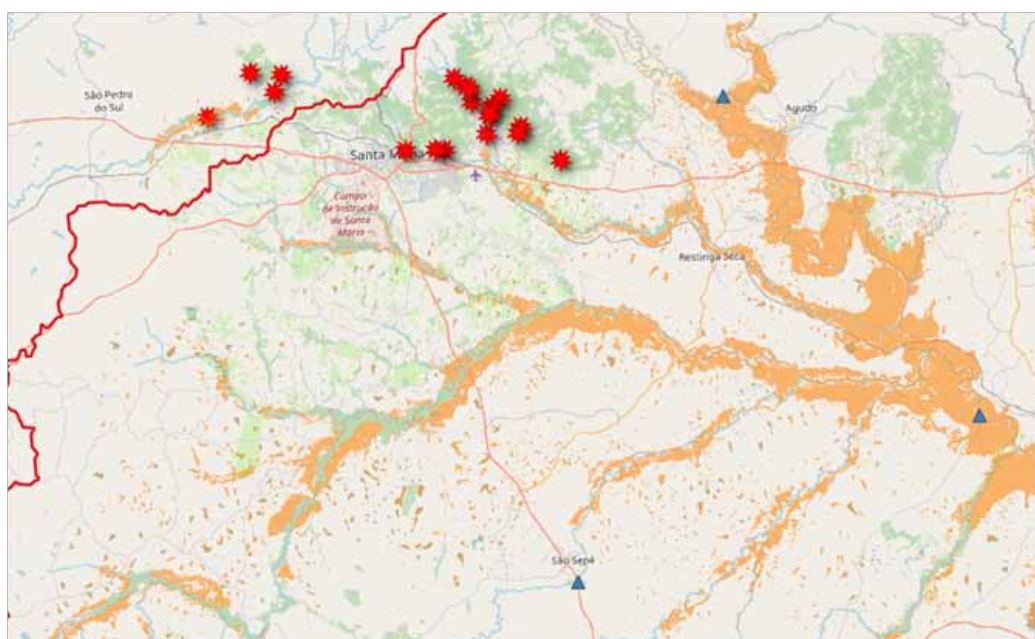


Figura 4. Locais em que aconteceu o rompimento de pontes na cidade de Santa Maria (*) e locais com monitoramento de vazões (Δ)

e temporais. Portanto, a não linearidade exige uma abordagem cautelosa e contextualizada para modelagem e análise hidrológica, considerando as especificidades de cada bacia e a escala em que se atua. Isso ressalta a necessidade de estudos detalhados e a utilização de métodos robustos, como modelos computacionais que integrem os diferentes processos, para alcançar estimativas mais confiáveis e representativas.

Em relação às pequenas bacias, por exemplo, nas cabeceiras do Rio Ibicuí-Mirim e Vacacaí-Mirim Grande, no município de Santa Maria, em menos de 400km² mais de 20 pontes foram totalmente destruídas pelas águas, dificultando de sobremaneira o transporte entre as regiões Central e Metropolitana do RS. A Figura 4 mostra a localização das 20 pontes colapsadas nesta pequena bacia e a localização dos três locais onde ocorre o monitoramento de vazões.

A Figura 5 apresenta exemplos de pontes colapsadas em pequenas bacias, respectivamente nas cidades de Imigrante, Liberato Salzano e Quevedos. O colapso destas e de outras pontes é causado por uma combinação peculiar de elementos geográficos e geológicos que ocasionam o rápido aumento do nível dos rios e da velocidade das águas, que, neste caso, arrancaram a vegetação ciliar existente no leito dos rios. Conforme mostram as imagens, em muitos casos as pontes e bueiros foram gargalos, represando a vegetação ciliar, gerando uma sobrecarga horizontal adicional contra as estruturas e estradas. Em um outro exemplo, na Figura 6 se observa a topografia e localização de cinco pontes destruídas na região do Arroio Grande, distrito de Santa Maria, nas cabeceiras do Rio Vacacaí-Mirim, onde a combinação de altas declividades nas encostas com solos rasos e pouco permeáveis, que contrastam com uma área com declividades próximas a zero no pé da encosta,



Figura 5.
Exemplos de pontes e bueiros colapsados em pequena bacia. (a) Liberato Salzano; (b) Taluleiro da ponte colapsada; (c) Quevedos; (d e e) Bueiro e ponte em Imigrante

Fonte: os autores.

Figura 6. Visão esquemática da topografia e pontes destruídas na região do Arroio Grande em Santa Maria, nas cabeceiras do Rio Vacacaí-Mirim. Fonte: Elaborado pelos autores com base em informações do Google Earth

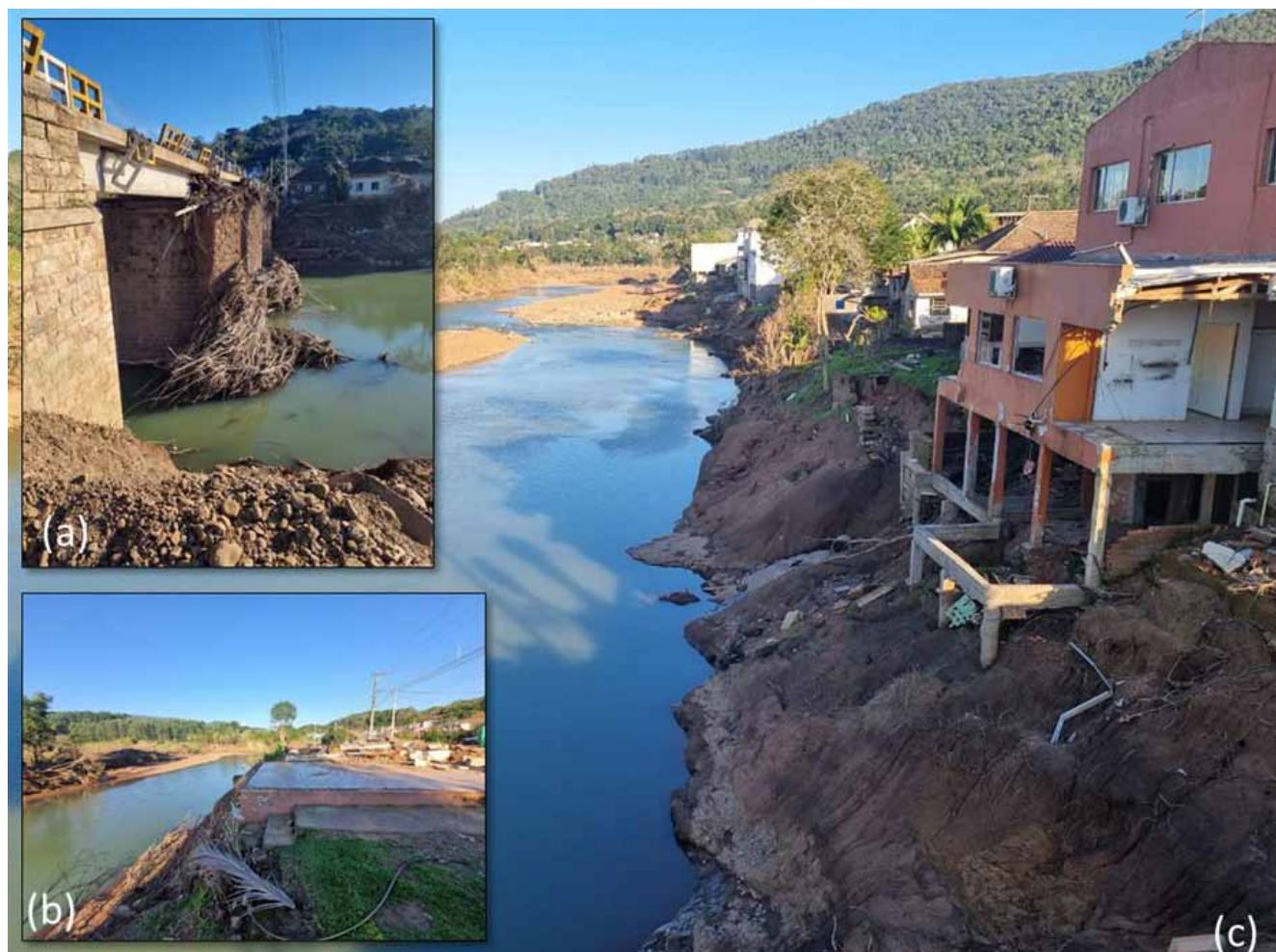
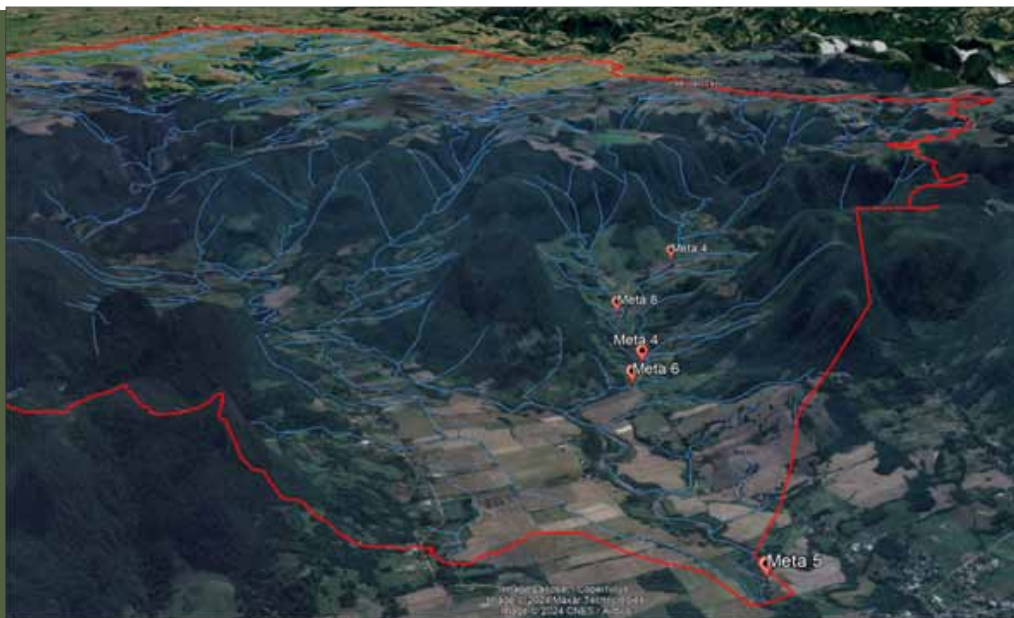


Figura 7. Imagens de Sinimbu após a tragédia. (a) Ponte parcialmente colapsada e (b e c) Taludes e edificações afetadas
Fonte: os autores.

cria uma situação extremamente crítica para a formação de cheias, com altas velocidades d'água que não encontram histórico na literatura técnica brasileira e que sobrepassaram as velocidades e alturas de projeto da maioria das pontes da região.



Figura 8. Delimitação das Bacias hidrográficas do Rio Pardinho e Rio Pequeno até a cidade de Sinimbu

Outro exemplo pode ser observado na cidade de Sinimbu, uma das mais destruídas pelas inundações de 2024 (Figura 7). Nessa cidade, se juntam a Bacia do Rio Pardinho, com aproximadamente 380 km², e a bacia do Rio Pequeno, com pouco mais de 220 km² (Figura 8). O encontro dessas duas bacias, com áreas relativamente similares, e com tempos de viagem das águas equivalentes, faz com que a cidade sofra com as inundações combinadas de ambas as bacias.

Diante do ocorrido, uma das primeiras questões que chama a atenção é a falta de um sistema de previsão de vazões que pudesse preparar a população, diminuindo mortes e perdas econômicas. O problema é que as bacias

mencionadas não possuem monitoramento de vazões, ou, como no caso de Santa Maria (Figura 4), as pontes se encontram em pequenas bacias (<400 km²) e a primeira estação de monitoramento de vazões se encontra no Vacacaí-Mirim com área >30.000 km². Dessa forma, dada a não linearidade já mencionada, não é possível extrapolar o comportamento do rio numa bacia de 30.000 km² para as bacias menores, uma vez que os comportamentos são diferentes e os resultados podem mascarar a real magnitude das inundações nas bacias pequenas. Sem o real entendimento do que acontece nas pequenas bacias, não é possível montar modelos efetivos e confiáveis de previsão.

Em geral, os grandes centros nacionais de meteorologia e sistemas de prevenção de desastres utilizam modelos e técnicas de monitoramento para grandes áreas, que geralmente cobrem estados inteiros e não conseguem individualizar os efeitos em macro e microrregiões. Diferentemente do que ocorre nos Estados Unidos (EUA), no Brasil, o monitoramento hidrológico foi desenvolvido com o objetivo de subsidiar o setor elétrico, focando principalmente nas grandes bacias hidrográficas (G1, 2024) e em sistemas de diferentes agências como o Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia), ANA (Agência Nacional de Águas), Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), defesas civis estaduais e municipais, agências estaduais e diversas empresas privadas que evoluíram, em muitos casos, sem integração efetiva. Dessa forma, as pequenas bacias hidrográficas e regiões de topografia complexa ficaram desprovidas de dados, dificultando a previsão e o alerta precoce de desastres.

O problema não se restringe às pequenas bacias do RS, uma vez que, conforme o Cemaden (2024), 70% dos desastres no Brasil acontecem em pequenas bacias hidrográficas, devido à sua proximidade com as comunidades e à sua sensibilidade às mudanças ambientais. Essas bacias menores são mais suscetíveis a eventos climáticos extremos, como enchentes, secas e deslizamentos de terra,

em decorrência do seu tamanho reduzido. Além disso, muitas dessas pequenas bacias estão localizadas em áreas urbanas dos municípios, bairros e distritos. A urbanização e o desmatamento aumentam a impermeabilização do solo, reduzindo ainda mais sua capacidade de absorção e aumentando o risco de enchentes. A própria urbanização nessas áreas costuma ser caótica e desorganizada, o que deixa as comunidades que vivem ao redor dessas bacias mais expostas aos riscos climáticos extremos (Andrade, 2024).

3. Estratégias de prevenção, mitigação e adaptação

Considerando a frequência e o poder destrutivo desses eventos, é necessário implementar diversas estratégias de prevenção, mitigação, assim como de adaptação e desenvolvimento de infraestrutura resiliente e resistente às mudanças climáticas. A Comissão Global de Adaptação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) preconiza que um investimento de apenas US\$ 800 milhões em sistemas de alerta precoce em países em desenvolvimento evitaria perdas de US\$ 3-16 bilhões por ano (OMM, 2023). Esse investimento envolve o desenvolvimento de conhecimento científico, redes de observação, sistemática de troca de dados entre agentes e atores, estruturas de supercomputação, e a tradução de previsões em avisos precisos sobre os impactos, além de avanços em telecomunicações e conectividade. Isso contrasta com o fato de que aproximadamente de 5% dos municípios do Brasil contam com sistemas de prevenção de desastres (IBGE, 2013). Nesse contexto, algumas dessas medidas para prevenção e mitigação seriam:

3.1. Medidas de Prevenção e Previsão

1. Monitoramento hidroclimático e geotécnico

avançado: Fortalecer os sistemas de monitoramento climático, hidrológico e geotécnico com tecnologias de sensoriamento remoto, radares meteorológicos, satélites e equipamentos

em campo para prever tempestades, enchentes e monitorar as encostas (e.g. pluviômetros, piezômetros, indicadores de nível d'água, medidores de deslocamento e inclinômetros).

2. Investigação e estudo dos movimentos de massa:

O conhecimento geológico-geotécnico é essencial para o estabelecimento do modelo fenomenológico sobre os processos e características de instabilização de uma encosta ou talude.

3. Modelagem e simulação: Desenvolver e atualizar modelos de previsão que considerem as mudanças climáticas para prever melhor os eventos extremos.

4. Alerta precoce: Baseado tanto nos dados, como na modelagem, implementar sistemas de alerta precoce eficientes para informar a população e autoridades com antecedência e precisão sobre a iminência de eventos extremos.

3.2. Medidas de mitigação

5. Infraestrutura resiliente: Projetar e construir infraestrutura resistente a enchentes e tempestades, como diques, obras de arte especiais, barragens, redes de drenagem eficientes e edificações

6. Planejamento urbano: Implementar um planejamento urbano que evite construções em áreas de risco e promova a criação de espaços verdes que ajudem na absorção da água da chuva.

7. Educação e conscientização: Promover campanhas de conscientização e educação sobre os riscos e medidas de segurança a serem adotadas durante eventos extremos.

3.3. Medidas para conferir resiliência

8. Planos de contingência: Desenvolver planos de emergência e contingência para resposta rápida e eficaz em caso de desastres naturais.

9. Recuperação e reconstrução: Estabelecer programas de recuperação rápida e reconstrução de infraestrutura danificada, garantindo que sejam aplicadas medidas preventivas para reduzir danos futuros.

10. Comunidades resilientes: Incentivar a formação de comunidades resilientes com treinamento em primeiros socorros, busca e resgate, e criação de redes de apoio comunitário.

3.4 Recursos e financiamento

11. Fundo de emergência: Criar e manter um fundo de emergência específico para desastres naturais, garantindo recursos financeiros imediatos para resposta e recuperação

12. Cooperação entre instituições e agências: Estabelecer parcerias e cooperação entre os diversos atores relacionados à gestão de eventos para troca de conhecimentos, tecnologias e recursos que fortaleçam a capacidade de resposta a desastres. A operacionalização de sistemas de previsão e monitoramento de alta resolução, adequados para pequenas bacias – especialmente em regiões de topografia complexa –, é fundamental e depende da cooperação entre instituições, permitindo o compartilhamento de técnicos e dados, além de manter os custos viáveis em um país continental como o Brasil.

Entre as medidas mencionadas, este artigo foca nos sistemas de alerta precoce, que são fundamentais para salvar vidas e proporcionar benefícios econômicos significativos, e em particular, nas atividades desenvolvidas na Região Central do RS por equipes da UFSM. No entanto, como será discutido a seguir, a efetividade desses sistemas depende da implementação de várias outras medidas. Ainda, o desastre ocorrido entre abril e maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul evidenciou deficiências nos sistemas e estruturas de monitoramento, alerta e resposta em diversas dimensões. Essas deficiências vão desde a falha

em prever corretamente a magnitude e localização dos volumes de chuva até a transmissão dessa informação para aqueles que mais precisavam, especialmente os moradores das encostas das pequenas bacias. No entanto, apesar das suas deficiências, o fluxo dessas informações foi fundamental para salvar inúmeras vidas no estado.

O monitoramento meteorológico local focado na região permitiu monitorar e informar em tempo quase real os quantitativos de chuva em regiões críticas (Figura 9). O sistema de monitoramento da UFSM possui um disdrômetro, equipamento que mede características da precipitação, velocidade e diâmetro de gotas, permitindo calcular taxas instantâneas, durante o evento. Por várias horas foram registradas taxas de precipitação superiores a 50mm/h, consideradas como altamente severas.

4. Atividades desenvolvidas na UFSM para o desenvolvimento de um sistema de alerta precoce robusto, integrado e efetivo para as pequenas bacias.

Durante o auge da crise causada pelo desastre, as estruturas das universidades federais serviram como ponto de apoio, disponibilizando produtos experimentais, laboratórios e pessoal treinado, e assim transformaram rapidamente o potencial acadêmico local em soluções práticas especializadas. O Rio Grande do Sul conta com a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e a Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), que oferecem cursos de graduação e pós-graduação em Meteorologia. Essas universidades trabalharam de forma integrada, criando sistemas regionais de previsão e monitoramento meteorológicos emergenciais como resposta ao desastre, fornecendo informações cruciais naquele momento. De maneira análoga, profissionais da área de hidrologia, geotecnia, geologia e áreas afins de diferentes universidades, como UFSM, UFPEL, Universidade Federal do Rio

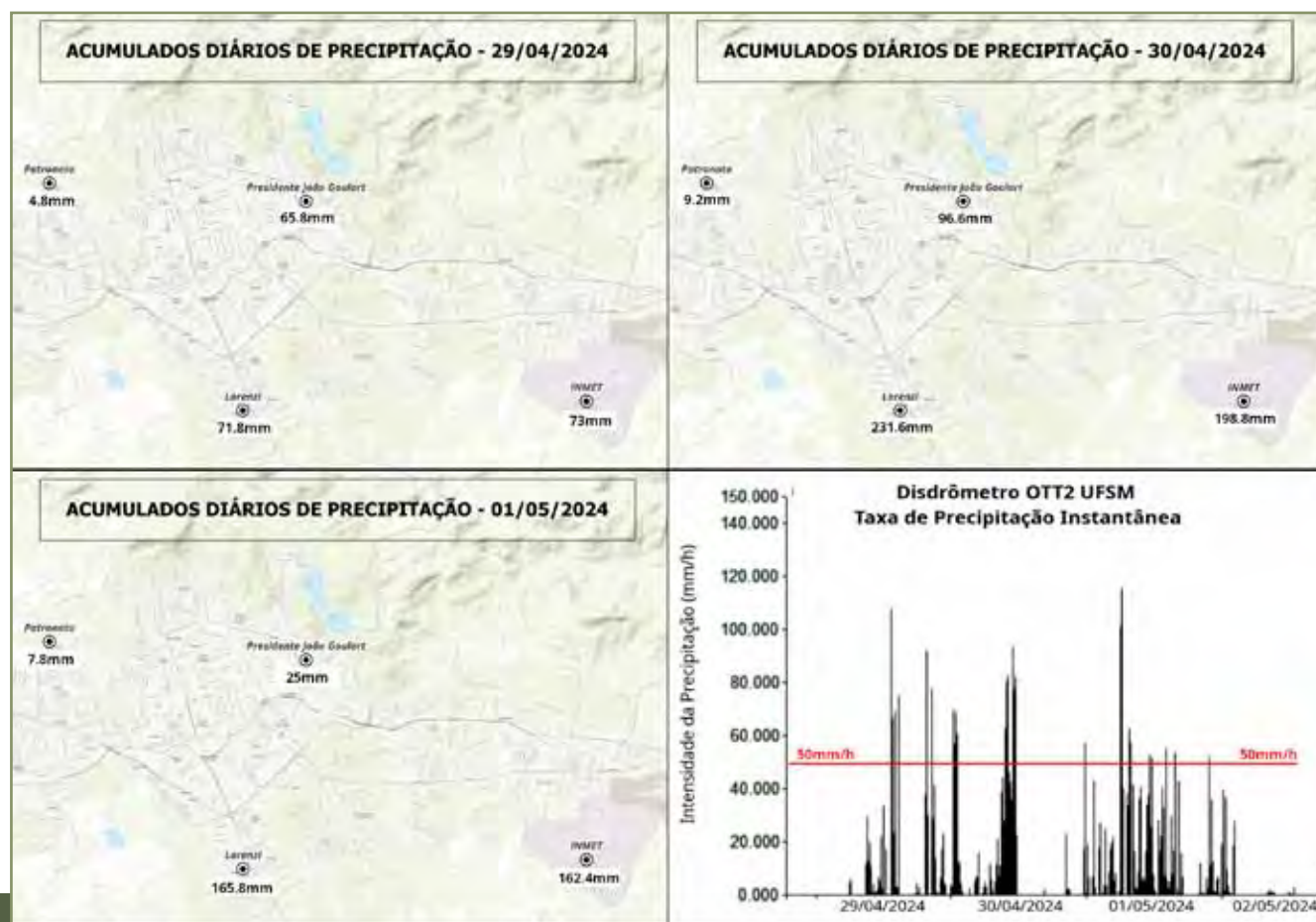


Figura 9: Monitoramento da precipitação em Santa Maria utilizando estações locais e da UFSM.

Grande do Sul (UFRGS) e Universidade Federal do Rio Grande (FURG), estiveram plenamente envolvidos, empregando e somando os máximos esforços para uma resposta imediata ao problema.

Um recorte dessa atuação feita pelos autores é apresentado aqui. Sendo a tarefa complexa, urgente e imediata, as atividades dos grupos capitaneados pelos autores foram realizadas de forma voluntária ou com recursos disponíveis no momento da calamidade estabelecida. Os grupos de trabalho focaram suas atividades para a captação de dados reais e atuais em campo e no escritório para obter a base de informações mínimas para o desenvolvimento de um sistema de previsão de riscos climáticos, meteorológicos, hidrológicos e geotécnicos em pequenas bacias hidrográficas. As principais frentes de trabalho são brevemente descritas a seguir.

4.1. Implementação de um sistema de previsão meteorológica focado na Região Central do RS

Os sistemas de monitoramento de tempo e clima dos EUA e do Brasil possuem diferenças estruturais e operacionais, devido à organização governamental, infraestrutura e foco de cada país. A National Oceanic and Atmospheric Administration (Noaa) possui alguns escritórios nacionais para previsão de tempo, clima, furacões e tempestades, contudo, a rede é composta na sua grande maioria por escritórios regionais, que realizam o monitoramento cotidiano e entram em regime de operação especial para eventos extremos quando acionados pelo escritório central. A Tabela 1, apresenta uma breve comparação entre a governança das informações meteorológicas dos EUA e do Brasil.

Tabela 1 -. Comparação entre a governança das informações meteorológicas dos EUA e do Brasil

País	Órgão principal	Função
EUA	Noaa (National Oceanic and Atmospheric Administration) e NWS (National Weather Service)	Monitora o tempo, o clima, os oceanos e a atmosfera, fornecendo previsões meteorológicas, alertas e estudos climáticos.
Brasil	Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia), CPTEC/Inpe (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais)	Inmet cuida das previsões meteorológicas, o CPTEC realiza estudos avançados de clima e o Cemaden monitora desastres naturais. Diversos estados brasileiros possuem serviços meteorológicos próprios, atuando integrados ao Inmet e a outros órgãos.

Atualmente, no Brasil, a integração do sistema nacional de meteorologia ainda se encontra fragmentada em diferentes atores. De forma irônica, o Rio Grande do Sul é o maior formador de meteorologistas na América Latina, mais de 25% de todos os profissionais atuantes no Brasil são egressos da Universidade Federal de Pelotas e da Universidade Federal de Santa Maria. Contudo, mesmo sendo um exportador de mão de obra na área de meteorologia e hidrologia, o RS ainda não atingiu maturidade para a criação de um serviço público estadual, ou uma agência reguladora para assuntos de tempo, clima e recursos hídricos que garanta uma atuação e segurança de longo prazo, optando por um sistema de contratação de empresas prestadoras de serviços.

O Brasil possui uma rede de estações meteorológicas automáticas com precária manutenção, poucos radares meteorológicos pertencentes a instituições federais e centros estaduais, os quais compartilham dados, mas ainda não estão estruturados com uma rede nacional. Em 2021, quase 30% das estações meteorológicas não tinham manutenção. De 767 equipamentos, 210 estavam em pane (G1, 2021). Agora, após o desastre, ações paliativas estão sendo executadas para melhoramento do sistema. Ações concretas estão sendo feitas para o melhoramento dos sistemas de observação orbitais. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe, 2024), Brasil e China firmaram um acordo para a construção conjunta de um novos satélites, CBERS-5, para previsão de tempo, e CBERS-6, para o monitoramento ambiental, fortalecendo

a colaboração científica entre os dois países. Regionalmente, alguns estados possuem serviços estaduais, como o Paraná, Santa Catarina, Mato Grosso, Ceará, Rio de Janeiro, e esses sistemas trocam informações com o sistema nacional, mas não estão hierarquicamente subordinados a ele (Lopez *et al.*, 2024).

4.2. Sistemas de alerta

Nos EUA, nas redes de estações meteorológicas automáticas ocorre a cobertura total por redes de radares Doppler de alta resolução, satélites meteorológicos geoestacionários alimentam o sistema meteorológico nacional, que dissemina seus alertas via o Noaa Weather Radio. O Noaa Weather Radio transmite alertas na banda VHF e integra o Sistema de Alerta de Emergência (EAS) para rádio, TV e celulares. No Brasil, o Inmet, Cemaden e serviços meteorológicos estaduais alimentam o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – Cenade sistema Nacional de Defesa Civil, e estes e emitem alertas via SMS, aplicativos, rádio e TV. Contudo, a integração entre esses atores ainda é um desafio a ser vencido, melhorando os sistemas de comunicação interna, externa e governança.

O Monitoramento de Desastres Naturais nos EUA tem governança e estrutura hierárquica nacional definida, o que facilita a integração dos produtos Noaa, NWS, Femae serviços locais para rápida resposta a desastres naturais. Esse sistema permite que fenômenos de curta duração, como tornados, sejam previstos e alertados

em escalas de tempo de curtíssimo prazo. No Brasil, mesmo que houvesse extrema eficiência entre a comunicação interna, a longa cadeia de atores, somada à distância da tomada de decisão e o ponto de demanda, ainda são um entrave para o sistema. Neste sentido, a regionalização do problema via os serviços meteorológicos estaduais e ainda a especialização dos serviços climáticos para pequenas bacias são essenciais para a detecção de eventos extremos locais.

Sendo assim, os EUA possuem um sistema mais robusto, formado por parcerias público-privadas, polivalente, com maior investimento em infraestrutura de monitoramento em superfície, radares meteorológicos e satélites, produzindo um sistema eficiente para a gestão energética, mas principalmente um sistema de alerta de riscos climáticos eficiente para a população. Os dados de altíssima resolução produzidos pela Noaa permitem identificar riscos com precisão de poucas centenas de metros. Ou seja, a rede nacional fornece informações geoespaciais que possibilitam um monitoramento macro e microrregional simultaneamente.

No Brasil, há um sério problema de governança para integração de dados fundamentais para a proteção da população. Apesar de existirem vários sistemas de observação meteorológica públicos e privados em território nacional, não há políticas públicas efetivas para integração e livre acesso aos dados, o que frequentemente gera sistemas caros e redundantes. Na tentativa de criar um ordenamento, a Comissão de Coordenação das Atividades de Meteorologia, Climatologia e Hidrologia (CMCH) foi estabelecida pela Lei nº 10.683, de 28 de maio de 2003, e posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 6.065, de 21 de março de 2007. A Comissão é composta por 22 membros, incluindo representações do Governo Federal, Centros Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos, sociedade civil e organizações representativas de empresas e profissionais. Contudo, as atas das sessões ordinárias e

extraordinárias indicam que as atividades estavam paralisadas desde 2015, e apenas em dezembro de 2023, após um desastre, a Comissão foi reativada (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2025). Outro exemplo da necessidade de coordenação e regulamentação nacional e estadual, são as ações realizadas paralelamente no Rio Grande do Sul pelo Governo do Estado e prefeituras, muitas vezes, cada ente investindo em sistemas de observação e equipes independentes, e não raro redundantes.

A solução sistêmica e integrada só virá com uma política nacional e estadual que estabeleça governança e obrigações em uma estrutura hierárquica e regionalizada. Um sistema que garanta informações em pequenas bacias e que assegure informações precisas para a gestão integrada das microbacias.

4.3. Disseminação e comunicação de avisos

Nos Estados Unidos da América, além de escritórios regionais de meteorologia, existe também o uso de tecnologias sólidas para a transmissão de mensagens para regiões específicas informando o fenômeno, localização e medidas de proteção para o evento. O Noaa Weather Radio All Hazards (NWR) é uma rede nacional de estações de rádio que transmite continuamente informações meteorológicas diretamente do escritório regional do Serviço Nacional de Meteorologia (National Weather Service) mais próximo. Dessa forma, a população é continuamente informada sobre os avisos, alertas, previsões e outras informações sobre perigos, 24 horas por dia, sete dias por semana. Conectada com o Sistema de Alerta de Emergência da Comissão Federal de Comunicações dos EUA, o NWR é uma rede de rádio de “Todos os Perigos” (All Hazards), tornando-se sua fonte única para informações abrangentes sobre clima e emergências, incluindo terremotos, vazamentos químicos, derramamentos de petróleo e segurança pública. Todos os equipamentos pessoais de radiorreceptores em veículos, ou rádios portáteis

possuem o sistema de recepção do NWR, o qual é ativado interrompendo as transmissões de esportes, músicas e TV.

No Brasil, um sistema similar, o Cell Broad Casting (Defesa Civil do Rio Grande do Sul, 2024), foi instalado, e busca resultados similares, mas a base do sistema presente nos EUA e o proposto pela WMO não está no meio de disseminação, mas sim no serviço meteorológico especializado e regionalizado. Outras iniciativas complementares aumentam a eficiência do sistema, como mensagens baseadas em localização; mensagens disseminadas por rádio, aplicativos móveis e redes sociais; instalação de sirenes e comunicação via rádios comunitários em áreas remotas.

Durante o desastre de maio de 2024, a ausência de um serviço meteorológico estadual profissional no estado do Rio Grande do Sul causou uma rápida saturação no sistema, devido ao exponencial crescente de demandas. No Paraná e em Santa Catarina os serviços de meteorologia dos governos dos estados contam com mais de 20 profissionais de meteorologia em cada estado, e alguns municípios possuem as próprias equipes, como é o caso de Blumenau.

No RS, à época do desastre, com a chegada da cheia na região metropolitana, com mais de 90% dos municípios do estado afetados, as inúmeras ocorrências sobrecarregando os profissionais de meteorologia na sala de situação estadual, a atenção ao interior ficou prejudicada, dificultando mais ainda as operações em locais remotos. Isso demandou a organização regional, sobretudo uma atuação voluntária e intensiva dos cursos de Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria e Universidade Federal de Pelotas. Em uma rápida mobilização, equipes de previsão de tempo regionalizadas foram montadas para atender as demandas locais, fornecendo boletins de tempo atualizados e monitoramento em tempo real. Essa força-tarefa envolveu mais de 40 profissionais das equipes da UFSM e UFPEL. A cobertura oferecida por essa operação emergencial atendeu mais de 2.400.000 habitantes, aproximadamente 22% da população gaúcha nas regiões Centro, Campanha e Sul. Os produtos meteorológicos de previsão de tempo utilizados para fins didáticos e de pesquisa foram rapidamente adaptados para a atividade operacional, permitindo a identificação dos padrões meteorológicos típicos para ocorrência de tempestades (Figura 10).

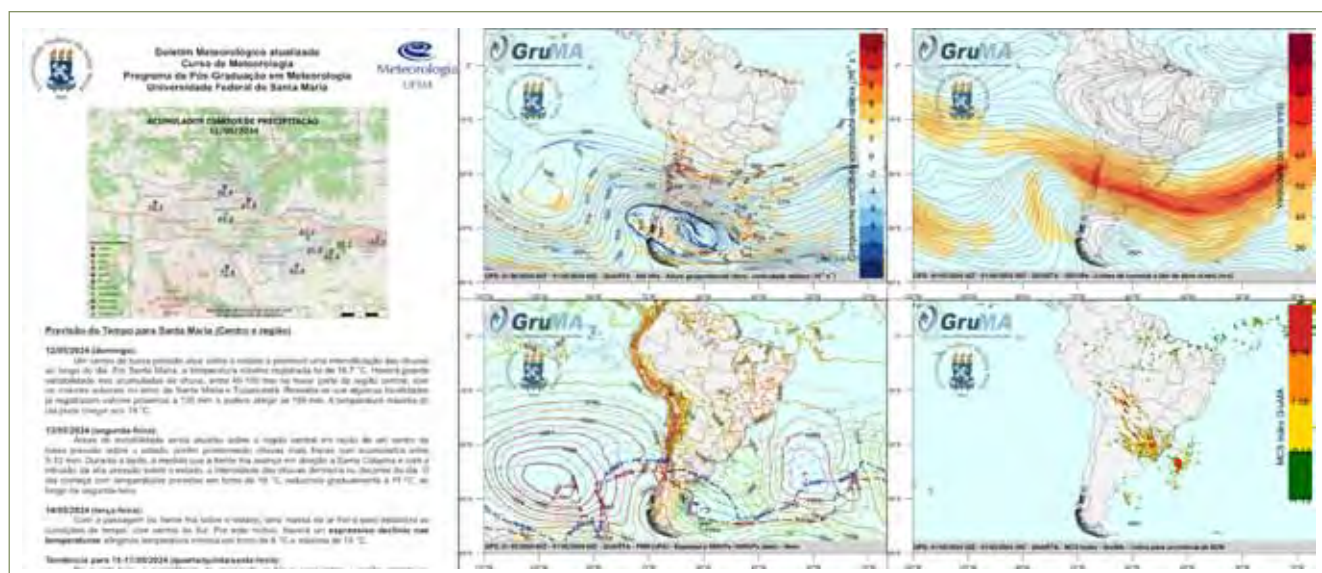


Figura 10. Exemplo do boletim meteorológico de divulgação regional e produtos de previsão numérica de tempo caracterizando o período do desastre

Essa experiência empírica vai ao encontro das recomendações da WMO (WMO, 2023), mas sobretudo do Princípio da Localização Central ou à Teoria dos Lugares Centrais, desenvolvida por Walter Christaller em 1933, em que os serviços e as atividades econômicas tendem a se localizar de forma hierárquica, buscando proximidade com a demanda para minimizar custos e maximizar eficiência (Christaller, W., 1966; Ballou, R. H., 2004).

Esse processo permitiu que as autoridades locais tivessem informações confiáveis para uma cadeia de comunicação padronizada e confiável, trazendo eficiência para as operações de busca e salvamento das populações em risco, sendo elas via aérea ou terrestre. O produto de previsão para base de nuvens e teto de voo, permitiu apoiar operações de aeronaves de pequeno porte do grupo Ases (Apoio Aéreo em Situações Especiais), uma rede de voluntários sem fins lucrativos, que transportou medicamentos e pessoal de saúde, em mais de

60 operações (Figura 11). No contexto regional as Rádios UNIFM (FM 107,9 MHz) e Universidade (AM 800Hz) da UFSM demonstraram-se com ferramentas eficientes para a transmissão de informação, haja vista que a recepção das informações pela população pode ocorrer em longas distâncias, não depende de redes de telefonia, ou até mesmo da rede de energia elétrica.

4.4. Preenchimento das lacunas nos dados hidrometeorológicos com monitoramento *in loco* em bacias escolhidas

Como mencionado, um dos problemas para gerar previsões climáticas, hidrológicas e geotécnicas, prevendo os possíveis locais de alagamentos e movimentos de massa, é a falta de informações nas pequenas bacias. Dessa forma, foi realizado o levantamento topográfico com a utilização de Veículos Aéreos não Tripulados (Vants) acoplados a outras informações para fazer um levantamento

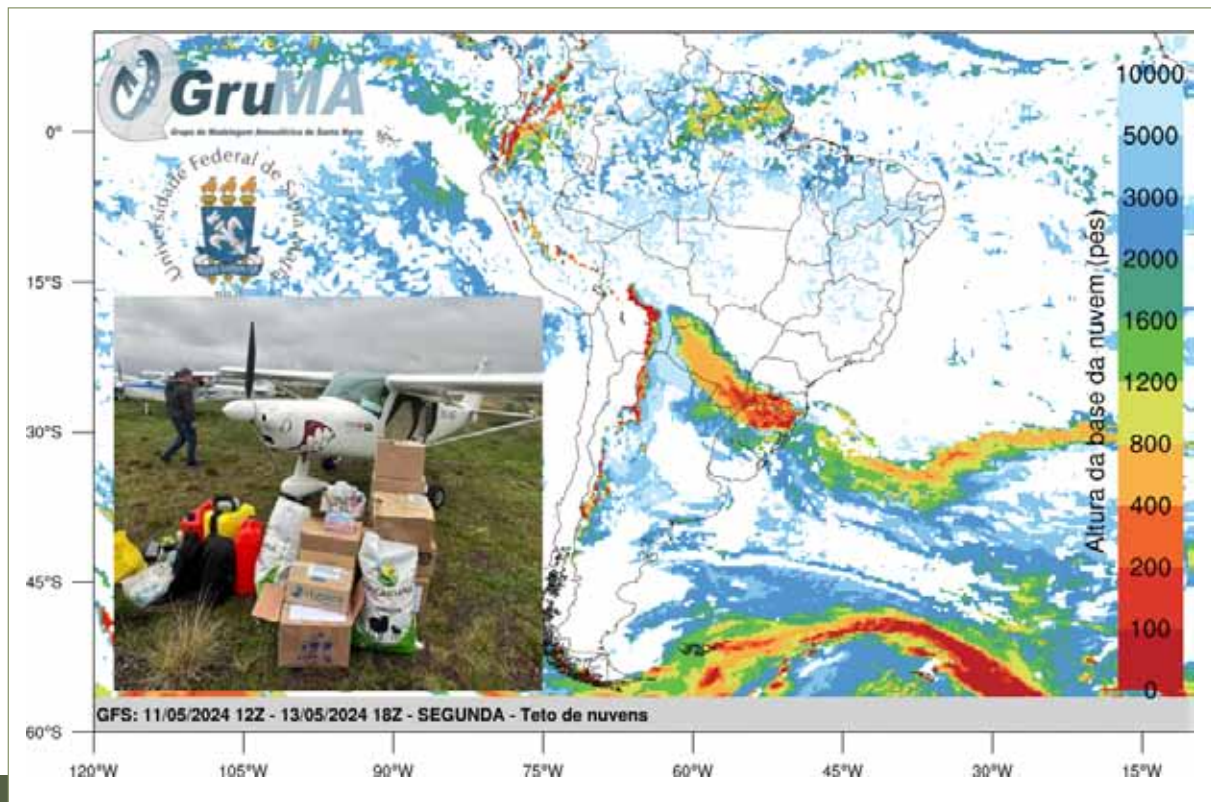


Figura 11: Produto meteorológico para apoio às operações de transporte de insumos médicos em pequenas aeronaves e atividades de resgate do grupo Ases Brasil

tanto da superfície como do fundo do rio em locais selecionados. O levantamento batimétrico do leito do rio foi feito com um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) (Figura 12), um dos equipamentos atuais com maior precisão. Ele revelou perfis de fundo, mostrando áreas de erosão e deposição, o que ajudou a estimar parâmetros e propor soluções para locais afetados pela inundação. Também permitiu estimar velocidades (Figura 13), importante tanto para a calibração de modelos hidrológicos como para o dimensionamento de estruturas de pontes resistentes às velocidades extremas das águas.



Figura 12. Imagem captada durante a batimetria com ADCP e GNSS

Fonte: os autores.

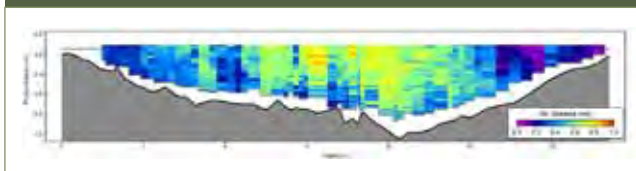


Figura 13. Resultado de medição da velocidade em uma microbacia do Rio Grande do Sul

Fonte: os autores.

4.5. Mapeamento de áreas de risco de inundação

O mapeamento das áreas inundadas em maio de 2024, utilizado para diversos fins no RS (Possanti *et al.*, 2024), foi realizado com imagens de satélite disponíveis no momento. Devido às nuvens do evento de maio, existem apenas imagens capturadas cinco dias após o evento principal. Portanto, não foram registradas pelo satélite as inundações nas bacias menores e com escoamento mais rápido, onde as águas já haviam baixado. Em locais selecionados, equipes da UFSM fizeram medições das cotas de inundação (Vants, GPS de alta precisão, etc.), confeccionando mapas detalhados em alta resolução para identificação de zonas de inundação (Figura 14), movimentos de massa e vulnerabilidades socioeconômicas. Essas informações são essenciais para a calibração dos futuros modelos de previsão de vazões nesses locais. Um modelo sem calibração precisa pode não produzir resultados confiáveis e expõe a população a riscos.



Figura 14. Exemplo de mapeamento da inundação no Rio Santa Maria, na região da localidade de São Simão, a partir de dados levantados em campo e modelagem hidráulica

Fonte: os autores.

4.6. Modelagem hidrológica e hidráulica

Modelagens hidrológicas e hidráulicas foram realizadas em certas selecionadas. A Figura 15 mostra a complexa bacia do Arroio Grande, dividida em sub-bacias. Com essas simulações, foram criados mapas para diferentes cenários, como o de uma chuva com tempo de retorno de 100 anos (Figuras 16 e 17). Esse tempo de retorno indica um evento que se repete, em média, uma vez a cada 100 anos, sendo útil, por exemplo, no projeto de pontes e na análise de áreas de risco extremo. Para o evento de abril e maio de 2024, é considerado ter uma recorrência entre 70 e 80 anos. As simulações permitiram estimar também velocidades da água (Figuras 18 e 19), indicando regiões nas quais, mesmo que o nível de água não seja elevado, a força da água seria mais do que suficiente para o arrasto de pessoas, veículos ou até moradias, indicando regiões de extrema periculosidade durante um evento extremo. Vale destacar, por exemplo, que as velocidades típicas de dimensionamento de pontes no Brasil são na faixa de 2 m/s. No entanto, durante o processo de modelagem foram determinadas velocidades que chegaram a 6 m/s em certos locais da região Central, muito acima do que uma ponte projetada para a velocidade média suportaria (a força da água varia com o quadrado da velocidade, ou seja, velocidades três vezes maiores, geram forças nove vezes maiores).



Figura 15. Esquema topológico de representação da Bacia do Arroio Grande

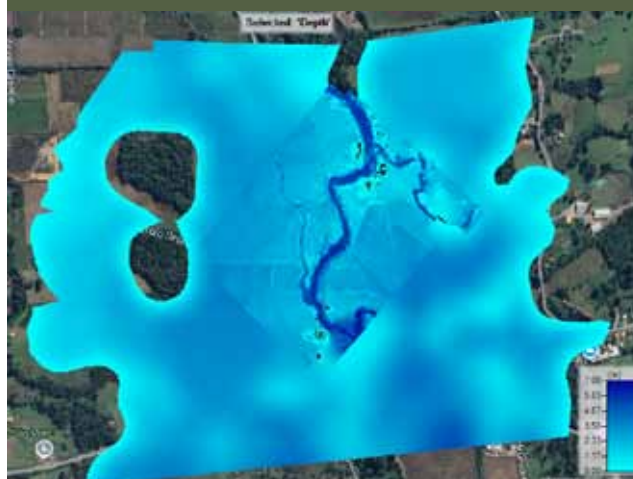


Figura 16. Mancha de inundação simulada na região da Ponte da Invernadinha, no Arroio Grande, para a vazão de 100 anos de recorrência

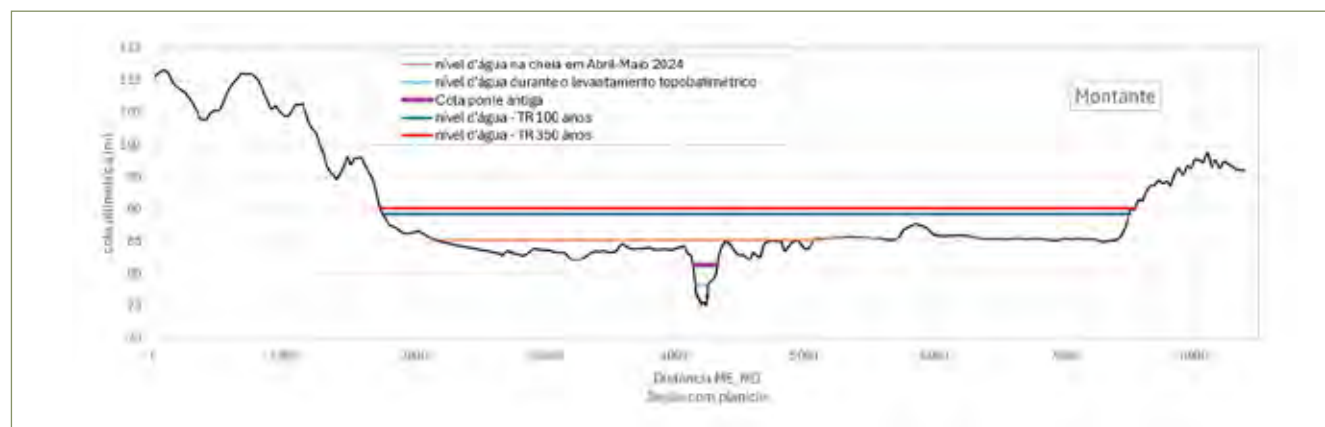
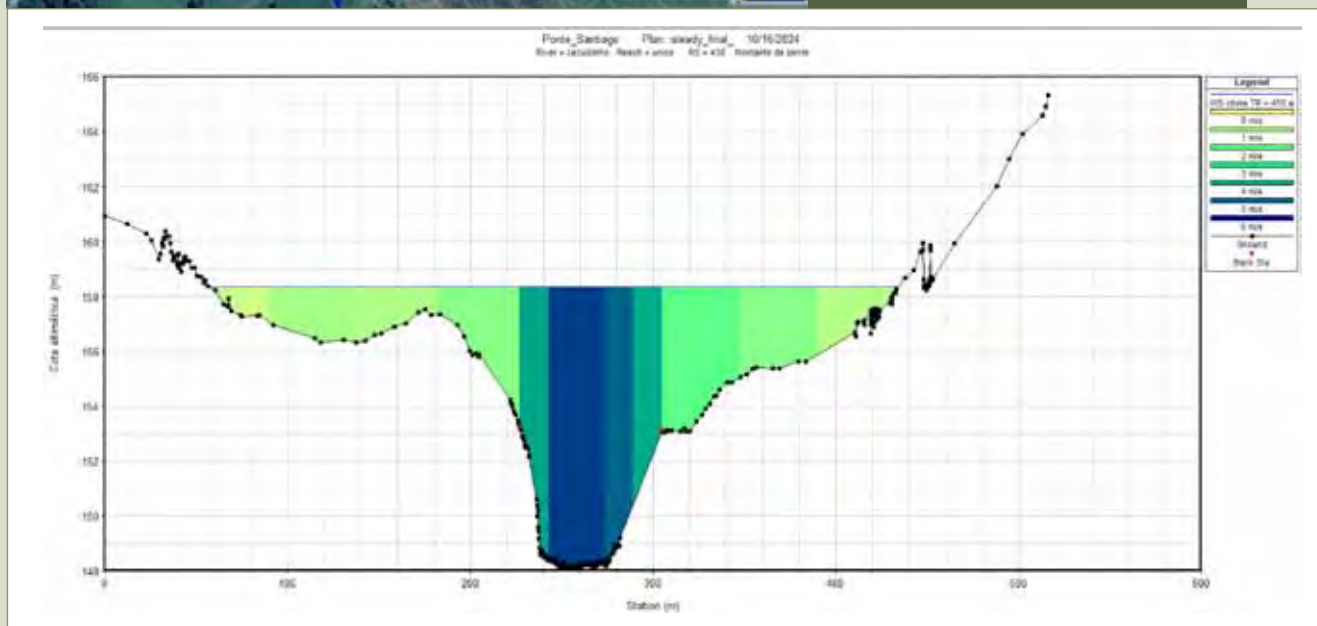
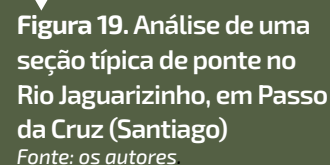
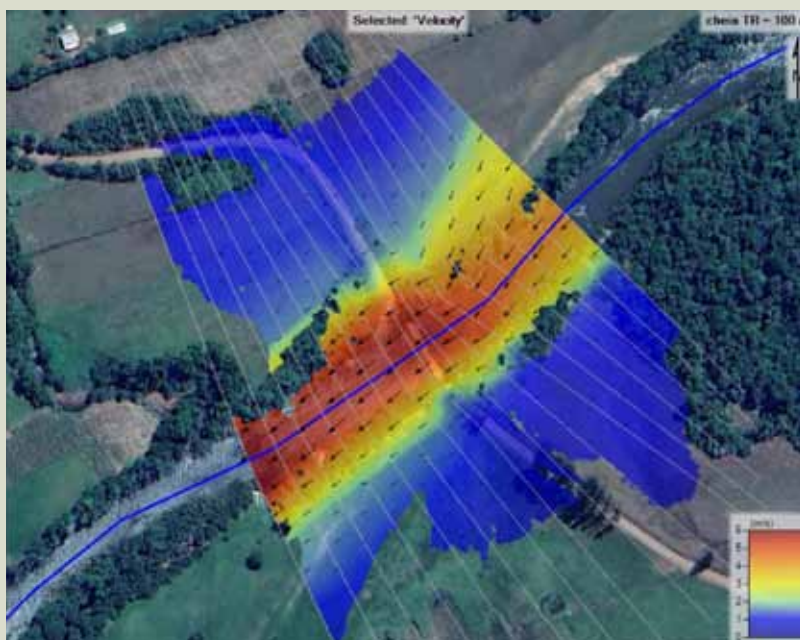


Figura 17. Seção transversal de montante do eixo da ponte, com indicação de nível d'água para a vazão com 100 anos de tempo de retorno

Fonte: os autores.



4.7. Educação e treinamento e disseminação das informações

Nos tempos deste documento, estão sendo completadas as campanhas de treinamento e conscientização para capacitar desde os usuários técnicos (como a Defesa Civil e Engenheiros de Prefeituras) até a própria população em medidas preventivas e respostas rápidas. A capacitação

está sendo coordenada pela Agência Nacional de Águas por intermédio do Grupo Técnico de Assessoramento para Estudos Hidrológicos e de Segurança de Infraestruturas de Reservação e de Proteção de Cheias no Rio Grande do Sul (GTA RS), e as ações estão previstas para começar em 2025.

Também, foram elaboradas notas técnicas durante o evento para disseminar as escassas



Figura 20. (a, b e c). Trincas na estrutura e piso da residência unifamiliar e (d) Degrau de abatimento no solo em grandes proporções (1,15m), encontrado no maciço abaixo da residência

Fonte: os autores.

informações e ajudar as equipes de emergência, como a análise preliminar das precipitações na região Central (Tassi *et al.*, 2024), mancha de inundação na mesma região (Allasia *et al.*, 2024) ou análise de precipitações intensas em municípios da região Central (Tassi *et al.*, 2025).

4.8 Levantamentos geotécnicos em campo para auxílio emergencial

Conforme já detalhado, eventos climáticos extremos têm se intensificado em todas as regiões do globo ao decorrer dos anos. Torna-

se inadiável projetar e garantir infraestruturas resilientes aos desastres naturais, muitos dos quais são acentuados pelas mudanças climáticas. Em vista disso, é imperativo realizar o planejamento de infraestruturas resilientes, capazes de se adaptarem às novas condições impostas pelas variações climáticas. Compreender e quantificar a magnitude desses riscos é essencial para elaborar estratégias de adaptação eficazes, visando à segurança e ao bem-estar da população.

O evento extremo ocorrido no estado causou escorregamentos de terra isolados ou generalizados, em regiões de serra, elevando as vazões e velocidades das águas dos rios. Em eventos dessa magnitude, em pequenas bacias, as vazões se multiplicam em escalas de cinco a dez vezes, e levam consigo solo, árvores, casas, estradas e pontes.

De forma emergencial foi realizado o auxílio geotécnico para diferentes prefeituras do interior do estado do RS, buscando auxiliar as equipes técnicas locais em inspeções de áreas de riscos, colaborando tecnicamente na

desapropriação de residências unifamiliares e na elaboração de planos de trabalho com a descrição das patologias ocorridas em taludes, pontes e estradas e o cadastro das possíveis soluções como plano de trabalho, conforme solicitado pelos governos estadual e federal.

A Figura 20 exemplifica a execução de inspeções em áreas de risco em maio de 2024. Conforme visualizado, observa-se que o local onde as residências estão locadas é composto por um grande talude, que se encontra instável, com visíveis trincas e degraus em diferentes locais e deslizamentos em algumas regiões. Aparentemente as rupturas são do tipo planares. Com relação à residência específica avaliada, foi constatado o rebaixamento do piso da edificação, trincas no terreno com formação de degraus de abatimento, trincas na estrutura da residência, inclinação das árvores e a ruptura do talude abaixo da residência. Foi recomendada a retirada imediata dos moradores locais, contudo, é necessário um estudo amplo e aprofundado nessa e nas demais regiões com patologias semelhantes, para o monitoramento atual e futuro das



Figura 21. Exemplo de avaliação dos taludes

encostas, com a aplicação de planos municipais de redução de risco (PMRR).

Na Figura 21 é exemplificada outra forma de auxílio emergencial. Neste caso, foram refeitas vistorias em conjunto com profissionais técnicos das prefeituras municipais para o levantamento

de riscos e proposição de soluções de contenções de taludes em nível de anteprojeto, para o cadastro no plano de trabalho federal. Neste caso específico, foi realizada a avaliação em campo e apresentada a solução julgada mais adequada para a contenção de um talude de uma das vias com pavimentação asfáltica. A ruptura desse



Figura 22. Exemplo de avaliação do subsolo pelo método de trincheiras para a indicação preliminar de tipologias de fundações e indicação de campanhas de investigações geotécnicas e geológicas

talude afetou duas edificações localizadas acima da cota de sua crista. No momento da vistoria, em junho de 2024, foi recomendada a construção de uma berma emergencial com solo no pé desse talude, para aumentar a sua estabilidade, o que resultou em tráfego parcial em meia pista na via local. Salienta-se que era imprescindível a estabilização desse talude, pois o agravamento de sua ruptura resultaria na interdição da pista, bem como na ruína das moradias circundantes.

Outra ação foi a investigação geotécnica para a realização de anteprojetos para reconstrução de pontes colapsadas. Para a investigação tátil e visual do subsolo local, com auxílio de retroescavadeira hidráulica, foram abertos, nas proximidades das cabeceiras das pontes, poços de inspeção, cujo objetivo foi permitir a observação das paredes e do fundo da escavação do subsolo local. O processo de inspeção foi feito seguindo o preconizado pela ABNT NBR 9604:2016 – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas, que especifica os requisitos para os procedimentos básicos na abertura de poço e trincheira, bem como os critérios para retirada de amostras deformadas e indeformadas de solo. A partir da investigação geotécnica local, foi possível descrever as características do subsolo de cada local investigado, visando à definição preliminar das possíveis tipologias de fundações que poderiam ser empregadas no desenvolvimento do anteprojeto para a reconstrução das pontes locais colapsadas e a definição das campanhas de investigações geotécnicas e geológicas para caracterização do solo e do substrato rochoso local para fins de projeto executivo. A Figura 22 exemplifica a ação executada em uma das pontes colapsadas em maio de 2024.

5. Considerações finais

O documento apresenta um diagnóstico de alguns dos desafios enfrentados na gestão de desastres

no Rio Grande do Sul, destacando as deficiências estruturais e institucionais que comprometem a eficácia dos sistemas de alerta e resposta. A recorrência de eventos extremos no estado reforça a urgência de políticas públicas mais assertivas e de um modelo de governança capaz de integrar dados meteorológicos, hidrológicos e geotécnicos de maneira eficiente.

O estudo revela que a fragmentação dos sistemas de monitoramento no Brasil e a falta de atenção às pequenas bacias hidrográficas são obstáculos significativos para a prevenção e mitigação de desastres. A experiência internacional demonstra que a regionalização dos sistemas de previsão, aliada à descentralização da tomada de decisão, pode aumentar a precisão das previsões e a rapidez da resposta às catástrofes.

As ações emergenciais realizadas durante o período do desastre, como a geração de previsões e avisos, apoio às pequenas prefeituras, simulações hidrológicas, etc., evidenciam a viabilidade e a eficiência de serviços climáticos regionalizados especializados em pequenas bacias. O rápido estabelecimento do monitoramento meteorológico, hidrológico e geotécnico, assim como suas respectivas previsões, foi possível pela disponibilidade de recursos materiais empregados em atividades rotineiras de pesquisa e disponíveis nos laboratórios da UFSM, mas, sobretudo, pela presença de recursos humanos altamente capacitados para a operação desses sistemas. Foi também fundamental a cooperação e complementação de ações com outras instituições, como Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, UFPEL, UFRGS, entre outras.

Com as lições aprendidas nessas atividades emergenciais, aliadas a um exaustivo trabalho de análise de experiências internacionais, a UFSM propôs um sistema de monitoramento e previsão para pequenas bacias como um passo

fundamental para reduzir a vulnerabilidade das populações afetadas. No entanto, a implementação desse tipo de iniciativa exige investimentos contínuos, cooperação interinstitucional e a criação de uma política estadual específica para gestão de riscos e desastres.

Por fim, o documento evidencia a necessidade de um planejamento urbano mais criterioso, da implementação de infraestrutura resiliente e da capacitação de comunidades para lidar com eventos extremos. O fortalecimento da ciência aplicada à previsão de desastres e a criação de políticas públicas integradas são essenciais para transformar o cenário atual e minimizar os impactos das futuras catástrofes climáticas.

Referências

- ANABOR, V.; STENSRUD, D. J.; DE MORAES, O. L. L. Simulation of a serial upstream-propagating mesoscale convective system event over Southeastern South America using composite initial conditions. *Monthly Weather Review*, 137(7), 2009, p. 2.144-2.163. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2008MWR2617.1>
- ANDRADE, M. F. A importância das cidades na crise climática. *Cienc. Cult.*, vol. 76 nº.3. São Paulo, jul.-set. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/2317-6660.20240065>
- ARGYROUDIS S. A. et al. Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: Case study on transport assets, *Science of the Total Environment*, vol. 714, 2020.
- BALLOU, R. H. Business Logistics/Supply Chain Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain. Pearson Prentice Hall, 2004.
- BONI. RS tem 14 pontes em rodovias estaduais e federais que precisam ser reconstruídas. *GZH*. 2024. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2024/07/rs-tem-14-pontes-em-rodovias-estaduais-e-federais-que-precisam-ser-reconstruidas-clz2zpl1800m0013p9jjdowyh.html>. Acesso em: 9 dez. 2024.
- CIROLINI, M. F. et al. Resiliência climática sob o ponto de vista de geotecnia de infraestrutura rodoviária. *Revista Estradas*, ISSN 1807-426X. Edição especial: Mudanças Climáticas: Impactos na Infraestrutura de Transportes, outubro de 2024.
- COLLISCHONN, Walter et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* – RBRH, ISSN 1415-4366, vol. 1, 2025.
- CUSTÓDIO, D. A. S. et al. Avaliação do comportamento resiliente de um solo argiloso e um solo arenoso do estado do Rio Grande do Sul devido à saturação pós-compactação. 2025.

- CUSTÓDIO, D. A. S. *et al.* *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 2, 2021, p. 2-10.
- CHRISTALLER, W. *Central Places in Southern Germany*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1966.
- DAWSON A. Anticipating and responding to pavement performance as climate changes. *Green Energy and Technology*, 2014, p. 127-157.
- DAWSON A. *et al.* UK climate change risk assessment evidence report: chapter 4, Infrastructure, 2016.
- DEFESA CIVIL DO RIO GRANDE DO SUL. Atenção: começa nesta quarta o novo sistema de envio de alertas. Disponível em: <https://www.defesacivil.rs.gov.br/atencao-comeca-nesta-quarta-o-novo-sistema-de-envio-de-alertas>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- DUNN, R. J. H. *et al.* Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices – An extension to Had EX3. *Earth and Space Science*, 11, 2024, e2023EA003279. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Atlas do Plano de Adaptação de Rodovias Federais* (Parf), 2017.
- EVANS, C.; TSOLAKIS, D.; NAUDE, C. Frame work to address the climate change impact sonroad infrastructure assets and operations. *Environmental Science & Enginnering*, 2009.
- FACCIN, C. *Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria/UFSM, 2018.
- FORZIERI G. *et al.* Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe, 2018.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO/GEO-RIO. Disponível: em <https://georio.prefeitura.rio>.
- GEOTECHNICAL CLIMATE CHANGE ADAPTATION PLAN. *National Highways*, vol. 2, jun. 2023, p. 6-22.
- GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/atualizacao-sobre-os-servicos-de-infraestrutura-do-rs-1-5-9h>>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/relatorio-sisperdas-evento-enchentes-em-maio-2024.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- GRIMM, A. M.; ACEITUNO, P. Estudio de la influencia de enso sobre el clima de América del Sul realizado durante década de 1980. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 30, n. 4, 2015, p. 351-357.
- GZH. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/ambiente/noticia/2024/05/em-24-horas-ao-menos-14-municipios-gauchos-registram-volume-de-chuva-superior-a-media-esperada-para-maio-no-estado-clvp67hr201gy011w9xcpj0l1.html>>. Acesso em: 8 jun. 2024.
- G1. *Quase 30% das estações meteorológicas do Brasil estão sem manutenção*. G1 Minas Gerais. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2021/07/19/quase-30percent-das-estacoes-meteorologicas-do-brasil-estao-sem-manutencao.ghtml>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-2024-boletim-de-mar%C3%A7o>>. Acesso em: 28 jun. 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Brasil e China assinam acordo para construção conjunta de satélite. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/>

- brasil-e-china-assinam-acordo-para-construcao-conjunta-de-satelite. Acesso em: 10 ago. 2024.
- JING, P. et al. Hydraulic behavior of Sandy subgrade under extreme rainfall in Alashan, China. *Transportation Geotechnics*, 42, 2023, p. 2-4.
- LOPEZ, Andrea Salome Viteri. et al. *Diretrizes para a implementação do nowcasting no Brasil*. São José dos Campos, SP: Inpe, 2024. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD2USNNW34T/4CSKRJL>.
- MARENGO, José A. et al. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 38, n. 112, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012>.
- MARENGO, J. A. et al. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. 2021. *Front. Clim.* 3:610433. DOI: 10.3389/fclim.2021.610433
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Comissão de Coordenação das Atividades de Meteorologia, Climatologia e Hidrologia. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/comissao-de-coordenacao-das-atividades-de-meteorologia-climatologia-e-hidrologia-1>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA. Disponível em: <https://www.gov.br/prf/pt-br>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- MNDAWE, M. B. et al. Assessment of the effects of climate change on the performance of pavement subgrade. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 7(2), 2015, p. 111-115.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/257750-onu-confirma-que-2023-bate-recorde-de-temperatura-global>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Potential impacts of climate change on U.S. transportation: Spacial report 290*. Washington, DC: The National Academies Press, 2008.
- NEMRY, F.; DEMIREL, H. *Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures*. Luxembourg: Publications Office, 2012.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA CLIMÁTICA. Mudança do Clima 2023, Relatório Síntese. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.
- POSSANTI, I. et al. *Mapeamento de áreas potencialmente atingidas pelas enchentes de 2024 na Bacia do Guaíba*. 2024. Disponível em: <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1PbDo3zattUNhLABIHuSOXPpQ0kVtaD0&ll=-30.001129753569806%2C-52.50502349999999&z=8>
- PROJETO ADAPTAVIAS. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias>. Acesso em: 4 abr. 2024.
- QIAO, Y. *Flexible Pavements and Climate Change: Impact of climate change on the performance, maintenance, and life-cycle costs of flexible pavements*. Doctor of Philosophy, 2015.
- RASERA, G. et al. Developing an MCS index using the climatology of South America. *Met. Apps*, 25, 2018, p. 94-405. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/met.1707>
- RASMUSSEN, K. L. et al. TRMM precipitation bias in extreme storms in South America, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2013, p. 3457-3461. DOI:10.1002/grl.50651.
- RATTANACHOT, W. et al. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. *Transport Policy*, 41, 2015, p. 159-166.

SCHUSTER, S. L. *et al.* Impacto das mudanças climáticas na seleção de ligantes asfálticos no Brasil considerando o grau de desempenho (PG). *Rio Oil e Gas Expo And Conference*, Rio de Janeiro, 2022.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Programa Gestão de Riscos e Desastres, Mapeamentos Geológicos-Geotécnicos Voltados para a Prevenção de Desastres. Avaliação Técnica Pós-Desastre, Gramado, RS, 2023, p. 14-17.

TASSI, R. *et al.* Nota Técnica nº 02/2024 PPGECA/CESA-UFSM: Análise das Necessidades da Rede de Monitoramento Hidrometeorológico após as Inundações de Abril/Maio 2024 na Região Central do Rio Grande do Sul. 2024.

TEOFILO, S.; SERRA, P.; GONÇALVES, E. Maioria de homens e moradores de Canoas: qual o perfil das vítimas das enchentes do Rio Grande do Sul. Publicado em 14 maio 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/sos-rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/14/maioria-de-homens-e-moradores-de-canoas-que-sao-as-vitimas-das-enchentes-do-rio-grande-do-sul.ghtml>.

WALKER, C.; HEITOR A.; CLARKE, B. G. Impact of drying-wetting cycles on the small strain behaviour of compacted clay, *Transportation Geotechnics*, 42, 2023.

WMO. Early Warnings for All: The UN Global Early Warning Initiative for the Implementation of Climate Adaptation [Executive Action Plan 2023-2027]. World Meteorological Organization (WMO), 2023.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Disponível em: <<https://wmo.int/media/news/climate-change-indicators-reached-record-levels-2023-wmo>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ZIPSER, E. J. *et al.* Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 2006, p. 1.057-1.072. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>.

Equipe de trabalho

Prof. dr. Vagner Anabor
Meteorologista
Doutor em Física
Professor Permanente do Programa de Pós Graduação em Meteorologia
Departamento de Física
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Prof. dr. Daniel Gustavo Picilli Allasia
Engenheiro Civil e Hidráulico
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor Permanente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Centro de Tecnologia
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

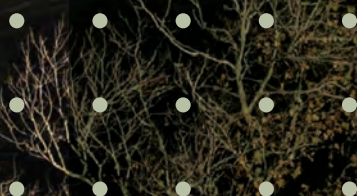
Prof. dr. Magnos Baroni
Engenheiro Civil/Geotécnico
Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia
Professor Permanente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Departamento de Transportes
Centro de Tecnologia
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM





Inteligência artificial na previsão do tempo em curto prazo: reduzindo os impactos de desastres climáticos

FABRÍCIO HARTER
LEONARDO CALVETTI
ELCIO SHIGUEMORI
FELIPE COPCESKI ROSSATTO





RESUMO

Neste trabalho, discute-se uma metodologia que representa o estado da arte em aplicações de aprendizado de máquina (machine learning) à previsão de tempo de até 3 horas, conhecida como nowcasting pelos meteorologistas. Apresentam-se os resultados da previsão gerada por uma Rede Neural Artificial, treinada com 20.000 imagens de um radar situado no Sul do Brasil. A avaliação é realizada de forma subjetiva pelo especialista a partir de métricas estatísticas. Os resultados foram validados por meio do estudo de um caso de um tornado ocorrido em junho de 2024, mostrando que a metodologia foi eficaz em simular a forma e a localização do sistema meteorológico durante as 4 horas de previsão analisadas (neste texto apresenta-se apenas a primeira hora). A similaridade entre as imagens de referência e as previstas é de 90%. Uma vez treinada, a rede neural é muito mais rápida computacionalmente do que modelos numéricos usualmente utilizados.



Rafa Neddermeyer/Agência Brasil

Bairro Praia do Laranjal, em Pelotas, foi inundado.

1. Contextualização

Diante de um cenário de mudanças climáticas, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) indica um aumento dos eventos considerados extremos: secas intensas e duradouras, chuvas com volumes muito acima da média climatológica, como a que ocorreu em maio de 2024 no RS, e aumento da frequência de tempestades severas com ocorrência de tornados e microexplosões, tempestades explosivas que geram ventos muito fortes que derrubam árvores, telhados de casas, postes de energia elétrica, entre outros (Goodfellow *et al.*, 2016).

Neste contexto, a ciência tem concentrado esforços na previsão de eventos severos de alto impacto, com maior exatidão do local e do horário em que o fenômeno realmente poderá ocorrer. As previsões de tempo de até 72h conseguem antever instabilidades em uma escala espacial referente à de um estado como Sergipe ou à metade sul do Rio Grande do Sul com precisão de até 98,5% de acerto, para variáveis de maior previsibilidade, como tendência de pressão. Há, por outro lado, as previsões de curto prazo (até 24h) e o nowcasting (até 3h), que provêm informações mais detalhadas na escala local, possibilitando

a análise da área de um município ou até mesmo do bairro onde o evento extremo poderá impactar. Ou seja, na escala de nowcasting, a previsão é de prazo muito mais curto do que a previsão de tempo, porém espacialmente mais bem detalhada. Por isso, as previsões de curto prazo e de nowcasting ganham muita notoriedade ao apresentarem métodos que conseguem identificar as áreas de tempestades com mais exatidão.

Atualmente as previsões meteorológicas são norteadas pelos modelos numéricos, os quais utilizam equações da hidrodinâmica e termodinâmica para simular os processos físicos da atmosfera (formação de nuvens), terrestres (trocas de calor e umidade) e a cobertura de gelo das calotas polares, incluindo a circulação geral, ou seja, a circulação dos ventos em toda a atmosfera terrestre. Porém, esses modelos numéricos não conseguem até hoje solucionar a questão da previsão local, devido à representação do contínuo de forma discreta, aos termos não lineares das equações, à imprecisão das condições iniciais, entre outros problemas. Assim, outros métodos de nowcasting são utilizados, tais como extrapolação e blending, onde é realizado o acompanhamento das trajetórias das tempestades (Conglan et al., 2013).

Ressalta-se que essa não é uma prerrogativa brasileira, ocorrendo no mundo todo: a Organização Meteorológica Mundial (WMO) definiu um grupo de trabalho especificamente para previsões de nowcasting, para que novas técnicas sejam abordadas para melhorar a previsão curto prazo (WMO, 2017). A preocupação com o desenvolvimento contínuo na previsão de nowcasting justifica-se pelas mudanças climáticas provocarem eventos extremos com maior frequência e maior intensidade. A decorrência desse cenário é preocupante, pois indica que a ocorrência de

tragédias como a verificada no RS em maio de 2024 poderá acontecer em intervalos de tempo menores e de forma cada vez mais devastadora. Por essa razão, a comunidade científica preocupa-se em subsidiar os tomadores de decisão, na mitigação e combate às consequências da nova ordem climática.

Portanto, neste trabalho, o foco é desenvolver um método para previsão de tempestades na escala de nowcasting por meio de algoritmos de aprendizado de máquina (inteligência artificial). Para tal, um conjunto histórico de imagens de radares meteorológicos são utilizados para treinar uma Rede Neural Artificial (ANN), a qual será capaz de simular a trajetória e o início de tempestades severas, uma vez detectado o primeiro foco de convecção profunda. Essa metodologia é especialmente promissora, pois o tempo computacional da previsão de uma ANN é muito menor do que o tempo computacional de um modelo numérico. Além disso, a literatura referenciada ao longo deste texto mostra que ANN tem maior precisão em relação aos modelos numéricos de equações primitivas e do que técnicas e extrapolação estatística.

Todavia, deve-se considerar duas fraquezas da técnica proposta, a saber: (i) dificuldade de obter imagens para o treinamento da rede, uma vez que o Brasil é um país com poucos radares meteorológicos e; (ii) a ANN só consegue prever o deslocamento e intensidade de um fenômeno que já esteja formado, ou seja o modelo neural não modela processos físicos, como formação e dissipação, apenas acompanha os movimentos de do fenômeno meteorológico atuante.

Na seção 2, a seguir, descreve-se como os cientistas têm abordado o problema proposto, ou seja, a previsão de nowcasting. Na seção 3, apresentam-se os dados utilizados e a metodologia proposta, bem como a configuração dos experimentos e métricas de avaliação.

A seção 4 é reservada para apresentar o caso estudado, ou seja, o tornado ocorrido no Sul do Brasil em 12 de junho de 2018. Na seção 5 constam os resultados para previsões de 1 hora e na seção 6 fazem-se considerações finais. Foge do escopo deste texto explicar a ANN utilizada, porém suas particularidades e conceitos fundamentais na área de ML são detalhados no excelente livro *Deep learning*, de Goodfellow e colaboradores (2016).

2. Outras formas de abordar a previsão de nowcasting

Duas formas práticas de entender previsões de médio e curto prazo são os casos da Fórmula 1 e alertas de tempestades durante um ciclone explosivo (ciclone bomba). Na Fórmula 1, as equipes precisam antecipar a possibilidade e a intensidade de chuvas na hora da corrida. Três dias antes da corrida, um meteorologista pode informar se vai ou não chover na pista e se o fenômeno vai durar a corrida inteira. Essa antecedência permite fornecer uma ideia da instabilidade atmosférica durante a prova com uma probabilidade de chuva para a região, mas sem detalhar o que ocorrerá na pista e no horário da corrida. Com essa previsão de médio prazo, as equipes podem contar com pneus de chuva, caso a chuva efetivamente se confirme. Entretanto, é apenas no dia da corrida, três horas antes de seu início, que a previsão de nowcasting, utilizando radar meteorológico, pode detalhar qual o horário que a chuva chegará exatamente na pista e se é forte ou não.

Um segundo exemplo ilustrativo refere-se à previsão de tempestades embebidas em ciclones extratropicais, comuns no Sul do Brasil. No protocolo atual, a equipe de meteorologistas da Defesa Civil envia um alerta de ciclone para um ou mais estados da Federação ou parte de algum deles, por exemplo, RS e litoral sul de SC. Com alguns dias de antecedência sabemos

que um ciclone vai gerar rajadas intensas de vento e provocar chuva volumosa. Mas não se tem a certeza das tempestades locais que o ciclone vai provocar. É somente com três horas de antecedência que o nowcasting, utilizando dados de radar meteorológico, fornecerá uma ideia exata de onde as tempestades estão se propagando e quais municípios vão atingir. É um detalhamento adicional que possibilita uma ação mais precisa do município.

Os EUA são conhecidos pela ocorrência de muitos eventos meteorológicos de altíssimo impacto: furacões no leste e sul, tornados na região central e nevascas ao norte e centro. Portanto, desde a Segunda Guerra Mundial, a adaptação de radares meteorológicos para uso civil, o lançamento em série de satélites na década de 70 e o desenvolvimento de modelos numéricos de previsão de tempo, nas décadas de 80 e 90, tornaram os EUA uma referência mundial na prevenção de desastres naturais. A demanda por alertas antecipados e mais precisos se tornou uma necessidade para a vida cotidiana, sendo facilitada pelo aumento do número de celulares de grande capacidade de armazenamento e vídeos, combinado com a rede de transmissão via internet.

Como funciona esse sistema de previsão dos EUA e como podemos usar essa experiência no Brasil? O National Hurricane Center (NHC), situado em Miami, é um instituto especializado em análise e previsão de furacões. O sistema de previsão avisa sobre a passagem de um furacão com antecedência de pelo menos sete dias. A partir desse marco, as mídias governamentais e privadas acompanham a evolução da trajetória e atualizam as previsões diariamente. Nesse primeiro momento, uma imensa área é indicada como possível região de passagem do furacão, mas é somente no dia em que o fenômeno efetivamente ocorre no local que podem ser detalhados os municípios os quais serão atingidos.

Veja que furacões são fenômenos de milhares de quilômetros de extensão e de duração de mais de sete dias. Mas e os tornados? Ao contrário de furacões, tornados são rápidos, duram minutos, possuem diâmetro de metros a poucos quilômetros e são muito difíceis de se prever. Nesse caso, o sistema norte-americano não consegue prever com dias de antecedência. Assim se utilizam dois principais métodos: *tornadowatch*, indicando que se deve ficar atento a possibilidade de um tornado, e *tornadowarning*, significando que um tornado foi identificado. Os alertas são emitidos pelo Storm Prediction Center para condados onde tornados podem ocorrer. A área de alerta é geralmente grande, cobrindo vários condados ou até mesmo estados. Um alerta de tornado indica que o radar meteorológico avistou ou indicou esse fenômeno, o que torna necessária uma mobilização: nesse momento, as populações dos municípios são alertadas para se proteger, parando suas atividades nos próximos minutos ou no período de duas a três horas. Esse sistema de aviso é uma decorrência do *nowcasting*, o qual respeita um prazo curto de tempo, por poucas horas, mas que efetivamente alcança o local do usuário, ou seja, o município ou bairro.

Com o avanço das técnicas de inteligência artificial, cientistas das áreas de tempo e clima experimentaram o uso em previsões de curto prazo para melhorar a previsão de variáveis meteorológicas, tais como a irradiância solar, usando redes neurais (Gutierrez-Corea *et al.*, 2016), velocidade do vento com modelos de árvores de decisão (Sasser *et al.*, 2022) e redes neurais recorrentes preditivas para previsão da propagação dos nuvens de chuva (Tuyen *et al.*, 2022).

Nessa pesquisa, propõe-se um modelo baseado em Redes Neurais Convolucionais Recorrentes (CNN) para previsão meteorológica de curto prazo (*nowcasting*). Essa abordagem

é uma alternativa às técnicas tradicionais de extrapolação estatística. A rede utilizada neste trabalho é conhecida na literatura como *PredRNN++*. São utilizadas como entrada/saída da *PredRNN++* imagens de quatro radares localizados no Sul do Brasil, disponíveis para acesso gratuito no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Para se verificar a precisão do *PredRNN++* são utilizados o Erro Quadrático Médio (RMSE), Medida do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) e Erro Absoluto Médio (MAE), além de análises empíricas do tornado que ocorreu no Sul do Brasil, no dia 12 de junho de 2018.

A rede provou ser uma alternativa viável para previsão *nowcasting*, já que reproduz a intensidade e localização dos sistemas emulados com horizonte de previsão de até três horas a cada seis minutos (neste texto mostra-se apenas a previsão de uma hora, devido às limitações de espaço).

3. Metodologia

Nesta seção, descreve-se o conjunto de dados utilizados e a metodologia proposta, bem como a configuração dos experimentos e métricas estatísticas de avaliação.

3.1. Conjunto de dados

Utilizaram-se 20.000 imagens do radar meteorológico operado pela Defesa Civil de Chapecó, SC, localizado na latitude -27.0833 e longitude 54-52.6183.

3.2. Configuração dos experimentos e métricas de avaliação

Nessa aplicação, a ANN foi treinada por 10.000 épocas, com uma média de 1,66 minuto para cada época, totalizando aproximadamente 277 horas de treinamento para o radar utilizado.

Para o treinamento da rede não é necessário grande recurso computacional, como supercomputadores ou servidores de grande porte. Neste trabalho a rede foi treinada em um desktop, com as seguintes especificações:

Processador: AMD Ryzen 3 2200g 3,7GHz

RAM: 16GB DDR4 2666MHz

Placa gráfica (GPU): Geforce GTX 1080 Ti 4GB GDDR5 128 Bits

Sistema operacional: Windows 10

Para redução do tempo computacional durante o treinamento da rede, utilizou-se API Cuda da NVIDIA. A API Cuda permite que o código utilize o poder de processamento paralelo das GPUs, para acelerar tarefas computacionais, incluindo simulações científicas e aprendizado de máquina.

Para a avaliação objetiva dos resultados, foram usadas três métricas: Erro Quadrático Médio (RMSE), Medida do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) e Erro Absoluto Médio (MAE). O RMSE representa o desvio padrão dos resíduos. Os resíduos representam a distância entre a linha de regressão e os pontos de dados, conforme Equação 1:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - f_i)^2}{n}} \quad \#(1)$$

Onde d_i é a verdade terrestre, f_i são valores preditos pela rede e n é o tamanho da amostra.

O índice SSIM é usado para medir a similaridade entre duas imagens, calculando a degradação da qualidade da imagem durante o processamento. O SSIM é dado pela Equação 2:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad \#(2)$$

A equação 2 fornece o SSIM para duas imagens x e y , onde μ_x e μ_y representam os valores médios

dos pixels das imagens x e y , respectivamente. σ_x^2 e σ_y^2 são as variâncias e σ_{xy} é a covariância de x e y . Além disso, c_1 e c_2 são duas variáveis responsáveis por estabilizar a divisão. A estrutura das duas imagens é comparada em termos de brilho, contraste e estrutura. Os resultados variam de -1 a 1, onde 1 indica uma maior similaridade entre as duas amostras.

Por sua vez, MAE representa o erro médio que as previsões do modelo neural têm em comparação com a referência, de acordo com a Equação 3.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - f_i| \quad \#(3)$$

Onde d_i e f_i são a verdade terrestre e os valores previstos e n representa o número de amostras. A MEA não possui um intervalo ou valor limite, quanto menor o valor de MAE, maior a precisão da previsão.

4. Um estudo de caso – 12/06/2018 – tornado no Sul do Brasil

Neste artigo, propõe-se uma técnica inovadora para a previsão de fenômenos meteorológicos na escala do nowcasting. Como comentado na contextualização, os fenômenos meteorológicos nessa escala de tempo devem aumentar em frequência e intensidade devido às mudanças no clima do nosso planeta, sejam elas naturais ou antropogênicas. Portanto, avalia-se a técnica proposta, simulando-se um evento extremo de tempo, posteriormente identificado como “tornado”, o qual é descrito no próximo parágrafo.

Durante as primeiras horas do dia 12 jun. 2018, na região da cidade de Água Santa, no estado do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil, foram registrados danos em três torres de energia elétrica que fazem parte da Linha de Transmissão (LT) Itá-Nova Santa Rita,

responsável pela geração de 525 kV de energia elétrica. Mais precisamente, duas torres foram completamente destruídas e uma sofreu danos severos. O centro de operação do sistema da Eletrosul relatou o incidente às 0h40 do dia 12 jun. 2018.

A empresa mobilizou mais de 80 técnicos para a recuperação da LT, que foi concluída em 17 jun. 2018, com a restauração da energia aprovada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico às 22h13. A Figura 1 ilustra os danos causados nas torres de transmissão após a alta velocidade dos ventos durante as primeiras horas de 12 jun. 2018, em Água Santa, Rio Grande do Sul.

Para fornecer uma visão geral da situação atmosférica em escala sinótica durante o evento destacado, a Figura 2 apresenta as imagens do satélite Goes-16 no Canal Infravermelho Termal às 0h15, 0h30 e 0h45 do dia 12 jun. 2018. Atenção: nesta parte do texto o leitor deve ter ciência de que a escala sinótica é a escala em que ocorre a previsão de tempo, cuja precisão

atinge até 98,5% em algumas variáveis, para previsão de 72 horas. Entretanto, essa previsão na escala dos estados e cidades não permite que a população e, em especial, o gestor público sejam advertidos de fenômenos de extrema importância, que ocorrerem na escala espacial com resolução que detalhe bairros e ruas.

Uma solução para ampliar esse detalhamento é monitorar a atmosfera através de instrumentos com resolução dos radares meteorológicos. Todavia, os radares mostram o passado e o presente. Assim sendo, nessas imagens pretéritas e atuais de radares meteorológicos, pode-se aplicar a RN e se obter o futuro (próximas 3 horas) em alta resolução. Ou seja, essa seção é um contraexemplo onde se mostra que a previsão sinótica, a qual a evoluiu muito no último século, ainda não é suficiente para mostrar fenômenos em alta resolução (metros e poucos quilômetros).

Em imagens no canal infravermelho termal (Figura 2), a cor branca refere-se a nuvens



Figura 1. Ilustração dos danos na linha de transmissão da Ceee-Equatorial. *Fonte: Eletrosul.*

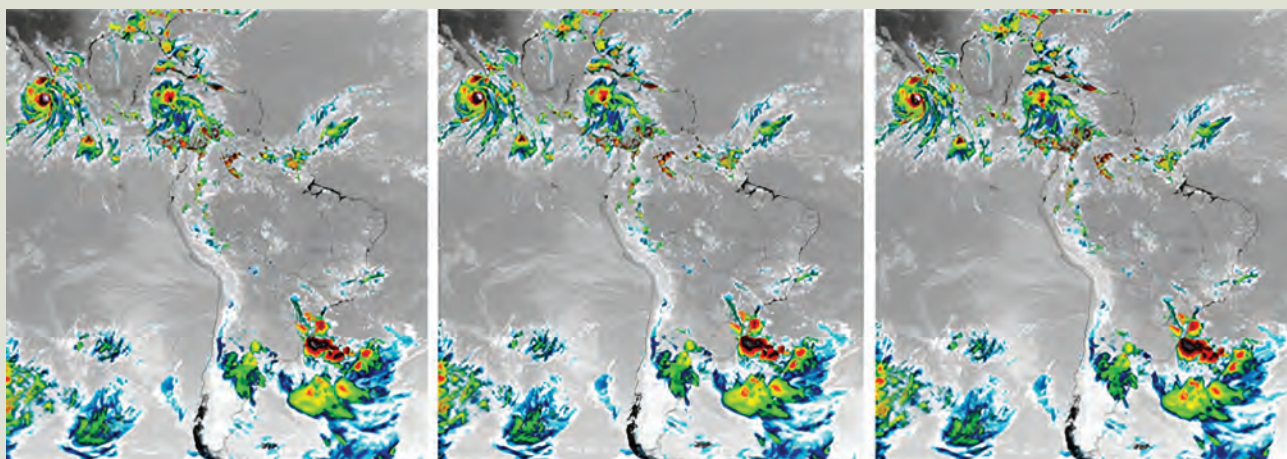


Figura 2. Imagens do Satélite Goes à 0h15 AM, 0h30 AM e 0h45 AM em 12 jun. 2018.

com topos altos e com possibilidade de altas taxas de precipitação, enquanto os tons de cinza referem-se à atmosfera seca. Esses topos brancos, em imagens com realce, como o vermelho da Figura 2, refere-se a nuvens Cumulonimbus, associadas a altas taxas de precipitação. As imagens da Figura 2 mostram nuvens altas com topos frios ao longo da costa do Rio Grande do Sul, sugerindo a presença de uma frente fria cobrindo todo o estado. A sequência de imagens demonstra a amplificação do sistema e o seu movimento em direção ao Oceano Atlântico. Destaca-se que o detalhamento nessas imagens é de escala sinótica e não de nowcasting.

Nas próximas imagens, é apresentado um produto que foi disponibilizado gratuitamente na página Web do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (CPTEC-Inpe), pelo Grupo de Previsão de Tempo GPT. A carta de superfície (Figura 3) apresenta a plotagem dos dados sinóticos (escala da previsão de tempo) e a informação correspondente à condição inicial do modelo numérico, ou seja o tempo “zero” (pressão em superfície – linha contínua e

espessura entre as camadas verticais 500/100 – linha tracejada). A carta de altitude apresenta a plotagem da radiossondagem (dados coletados por balão meteorológico em diferentes alturas da atmosfera terrestre), altura geopotencial (altura na atmosfera em função da temperatura), vento (barbela) e isotacas (linhas de igual velocidade de vento). Ou seja, como essas cartas referem-se a dados observados, são considerados uma boa referência para qualquer simulação ou análise sinótica.

Os campos representados nas Figuras 3 e 4 mostram uma típica onda que transporta uma frente fria se propagando do sudoeste para o nordeste, conhecida como Onda de Rossby. Esse sistema é caracterizado por uma área que separa duas massas de ar com diferentes temperaturas e densidades, onde a massa de ar frio se move sobre a área da massa de ar quente. Esse sistema causa quedas de temperatura, ventos fortes e precipitação na região pela qual se desloca. Nos níveis superiores da atmosfera (Figura 4), há características que extrapolam o objetivo deste texto, mas se pode afirmar que se confirma a propagação da frente mostrada na Figura 3.

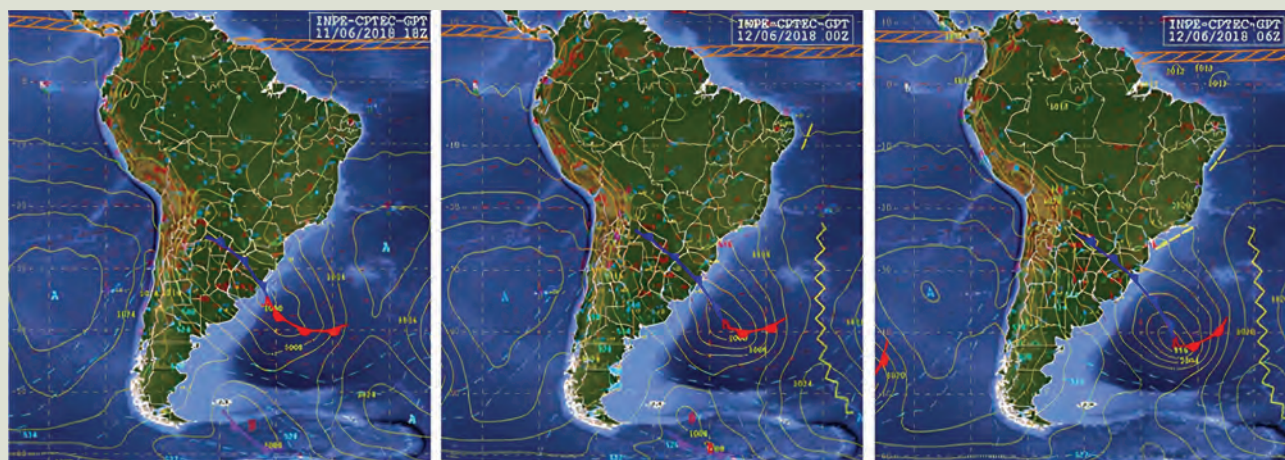


Figura 3. Campos de variáveis à superfície terrestre, em 11 jun. 2018 às 6h e em 12 jun. 2018 às 12h e às 12h06.

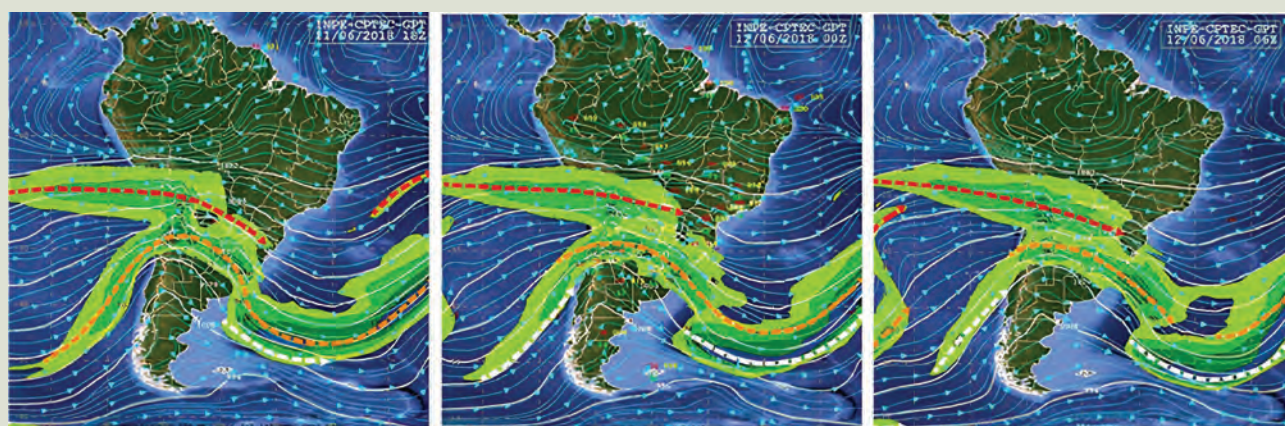


Figura 4. Campo de variáveis em altitude em 11 jun. 2018 às 6h e 12 jun. 2018 às 12h e às 12h06.

Para o leitor entender essa conclusão, deve acompanhar o traçado da frente fria, linha azul na Figura 3¹.

No entanto, há ainda algumas questões em aberto: por que somente a região de Água Santa experimentou ventos com velocidades superiores a 300 km/h? É possível prever ou identificar assinaturas de fenômenos em escala

menor que levam a eventos extremos? Ou seja, como lidar com o fato de que as ferramentas disponíveis para a previsão de tempo pouco auxiliam o previsor quando predominam fenômenos localizados e/ou de rápida formação?

A ciência ainda não tem uma resposta completa e definitiva para essas perguntas,

mas exige ferramentas que ajudem cientistas e meteorologistas a anteciparem as consequências de tais eventos. Isso inclui uma rede de observações de alta resolução, tanto na superfície quanto em altitudes mais elevadas da atmosfera terrestre, abrangendo medições diretas, como estações de superfície e sondagem atmosférica, bem como medições indiretas, tais como refletividade de radar e irradiâncias de satélite de alta resolução. O Inmet, órgão que representa o Brasil junto à Organização Meteorológica Mundial (WMO), tem estações automáticas à superfície em praticamente cada grau de latitude, exceto em regiões remotas como florestas tropicais.

É importante entender que uma rede de estações meteorológicas demanda manutenção contínua, com capacidade de transmissão e armazenamento dos dados e controle de qualidade obedecendo padrões da WMO. A Força Aérea Brasileira (FAB) é responsável por observações de ar superior (sondagens da atmosfera, Art. 47 da Lei do Código Brasileiro de Aeronáutica, de 19 dez. 1986) e a Marinha do Brasil (MB) pela rede de boias nos oceanos adjacentes ao país, conforme Decreto nº 70.200, de 24 fev. 1972. Entretanto, as sondagens são realizadas em alguns aeroportos apenas uma ou duas vezes ao dia, o que não é suficiente nem para o monitoramento em escala sinótica, tendo em vista um país de escala continental. Atualmente, encontram-se duas sondagens diárias realizadas pela FAB, em 10 aeroportos brasileiros, para acesso livre, na página Web da Universidade de Wyoming (UW, 2025).

Quanto à observação dos oceanos, a deficiência de dados é ainda maior do que em ar superior, haja vista que há duas boias no litoral brasileiro no período de redação deste texto (MB, 2025). Uma vez vencidas essas dificuldades, devemos projetar uma rede de alta resolução, pois precisamos de uma rede nessa escala para evoluirmos na previsão e monitoramento na

escala do nowcasting. Além dessas medidas diretas, urge a necessidade de completarmos nosso sistema de observação com medidas remotas, como satélites ambientais e radares meteorológicos. Informação animadora nesse sentido é que o Brasil lançará, em 2025, dois satélites para coleta de dados ambientais (Inpe, 2024). Uma abordagem para mitigar a falta de dados e cobertura de radar, especialmente na região Sul do Brasil, é empregada neste estudo, utilizando-se ANN para prever a propagação e intensidade de sistemas que causam eventos extremos na escala de nowcasting.

Portanto, com o objetivo de avaliar a capacidade da metodologia usando ANN para previsão de nowcasting, a PredRNN++ (Goodfellow *et al.*, 2016) foi treinada com imagens do radar de Chapecó e ativado por aproximadamente 1, 2, 3 e 4 horas a partir da gênese até a oclusão do sistema estudado. Assim, avalia-se a capacidade do modelo neural em prever os sistemas atmosféricos atuantes no domínio de interesse, do dia 11 jun. 2018, das 23h02, até o dia 12 jun. 2018, às 3h56. Utilizou-se o radar de Chapecó (SC), porque é o radar com melhor cobertura do município de Água Santa (RS), onde ocorreu o tornado.

Obviamente, o sistema meteorológico precisa estar formado para ser rastreado, pois o modelo neural não considera processos físicos, como formação e dissipação, mas apenas o deslocamento e intensidade do sistema a ser previsto. Com o sistema formado, espera-se monitorar a sua propagação e sua intensidade através da rede neural.

5. Resultados

Neste trabalho realizou-se a previsão para aproximadamente 1 hora, 2 horas, 3 e 4 horas a partir da ocorrência do evento, com a PredRNN++ (Goodfellow *et al.*, 2016) treinada com 20.000 imagens do radar de Chapecó.

Entretanto é importante observar que para a previsão de 0h02 até 0h56 ativou-se a rede com imagens entre 23h02 e 23h56 do dia anterior, para a previsão de 1h02 até 1h56 ativou-se a rede com imagens entre 0h02 até 0h56, para a previsão das 2h02 às 2h56 ativou-se a rede com imagens entre 1h02 até 1h56, e para a previsão das 3h02 às 2h56 ativou-se a rede com imagens entre 2h02 até 2h56. A seguir, mostra-se a previsão de 0h02 até 0h56 a partir da ocorrência do tornado ocorrido em Água Santa.

5.1. Previsão pela PredRNN++ para a região de Chapecó em 12 jun. 2018, de 0h02 até 0h56

A partir deste ponto do texto, os resultados são analisados na escala espaço-temporal de nowcasting. A primeira questão a ser abordada é qual sistema causou os danos observados. É comum que a imprensa e o público em geral classifiquem tal evento como relacionado a tornados (Tornadoes around the world | Royal Meteorological Society). Vale destacar que, apesar de um aumento considerável no número registrado de tornados no Brasil nos últimos anos (Lopes; Nascimento, 2020), a ocorrência desses fenômenos provavelmente é subnotificada, especialmente quando ocorrem em regiões desabitadas e durante a noite.

Isso ocorre porque não existe um sistema oficial de avaliação de danos para eventos relacionados a vento no Brasil (Lopes; Nascimento, 2020), nem uma rede de observação adequada para esses fins, de forma que os órgãos oficiais de meteorologia emitam previsões em escala de menor resolução. Os tornados têm resolução espaço-temporal na ordem de poucos minutos e centenas de metros, de modo que observar a vegetação, como árvores retorcidas, é um bom indicador de um tornado propagando-se sobre uma região específica.

De forma objetiva, imagens de satélite em órbita baixa são ferramentas importantes empregadas para a detecção de rastreamento de tornados, ventos de alta velocidade e até ocorrências de granizo. No entanto, radares de dupla polarização são as ferramentas de ponta para a detecção e classificação de tornados.

Durante as primeiras horas do dia 12 jun. 2018, todos os indícios apontam para a ocorrência de uma célula de tornado na região de Água Santa (RS), inserida em uma linha de instabilidade que acompanhava a frente fria cruzando a região Sul do Brasil naquele período.

Embora os conceitos de refletividade e convecção já tenham sido utilizados neste texto e sejam intuitivos, antes de se analisar as figuras apresentadas nos resultados, é importante reforçar estes dois conceitos: **refletividade e convecção profunda**. Os radares meteorológicos emitem uma onda eletromagnética que, ao atingirem o alvo, no caso hidrometeoros (gotículas de água ou gelo), são **refletidos** para a antena do radar. Esse sinal refletido é convertido em taxa de precipitação. Ou seja, se não há alvo (hidrometeoro) não há chuva e, quanto maior a quantidade de alvos, maior o volume de chuva. De uma forma sucinta, pode-se considerar que convecção é um movimento que eleva o ar úmido para níveis mais altos da atmosfera, onde a temperatura é menor e, por sua vez, pode reter menor quantidade de água, portanto condensa, forma nuvens e pode precipitar. Quanto mais alto for o nível que esse ar úmido subir na atmosfera, mais profunda é a convecção e mais intensa será a precipitação em forma de chuva ou granizo.

Na Figura 5, as imagens do radar de Chapecó (SC) entre 23h02 e 23h56 do dia 11 jun. 2018 mostram a refletividade na área de cobertura do radar. No entanto, os valores mais altos, que representam células convectivas mais

profundas, estão localizados a sudoeste do radar (a antena está no meio da circunferência). Esses pixels, com valores de refletividade superiores a 40 dBZ, região vermelha da figura, formam linhas de instabilidade onde o tornado pode ter ocorrido.

Para analisar os resultados, é importante entender a relação entre decibéis (dBZ) e precipitação, bem como diferenciar a quantidade de precipitação. Portanto, segundo Verdelho *et al.* (2024), considera-se que:

- Maioria das nuvens não precipita: 10 dBZ corresponde a aproximadamente 0,1 mm/h de precipitação;
- Chuvisco: 20 dBZ corresponde a aproximadamente 0,5 mm/h;
- Chuva leve: 30 dBZ corresponde a aproximadamente 3 mm/h;
- Chuva moderada: 40 dBZ corresponde a aproximadamente 12 mm/h;
- Chuva forte, tempestade, possível granizo: 50 dBZ corresponde a aproximadamente 60 mm/h;

- Chuva extremamente forte: 60 dBZ corresponde a aproximadamente 300 mm/h.

Das Figuras 6 a 10, a trajetória e a posição do sistema são observadas ao longo de um intervalo de 54 minutos. Ao se analisar os resultados, observa-se que a imagem prevista pela ANN tem alta semelhança com a imagem registrada pelo radar uma hora após a previsão. Isso mostra a capacidade preditiva do modelo neural, que reproduz os sistemas meteorológicos de forma próxima à realidade.

Além da posição, o modelo neural auxilia o especialista (previsor) a identificar regiões com maiores e menores refletividades, pois as figuras de esquerda (verdade terrestre, o que a rede neural deve reproduzir) são muito semelhantes às figuras previstas, imagem da direita. Essa capacidade de distinguir variações de intensidade é essencial para compreender a localização e a intensidade das características do sistema meteorológico atuante, no caso uma linha de instabilidade, representada pelas faixas vermelhas nas figuras.

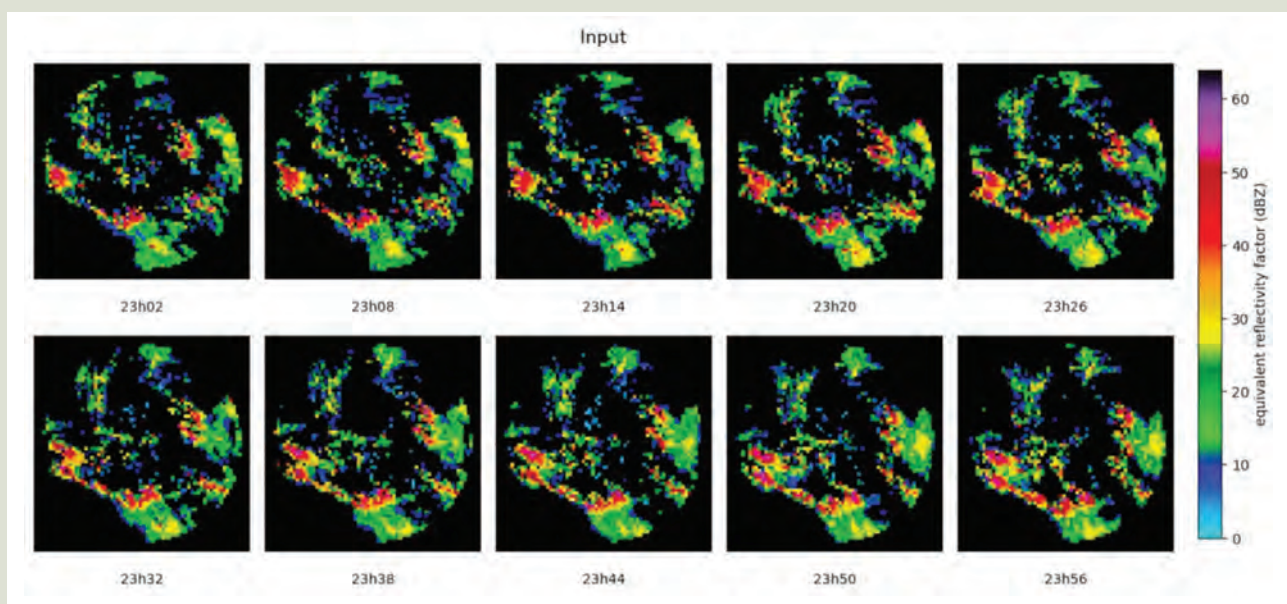


Figura 5. Campo de variáveis em altitude em 11 jun.e 2018 às 6h e 12 jun. 2018 às 12h e às 12h06.

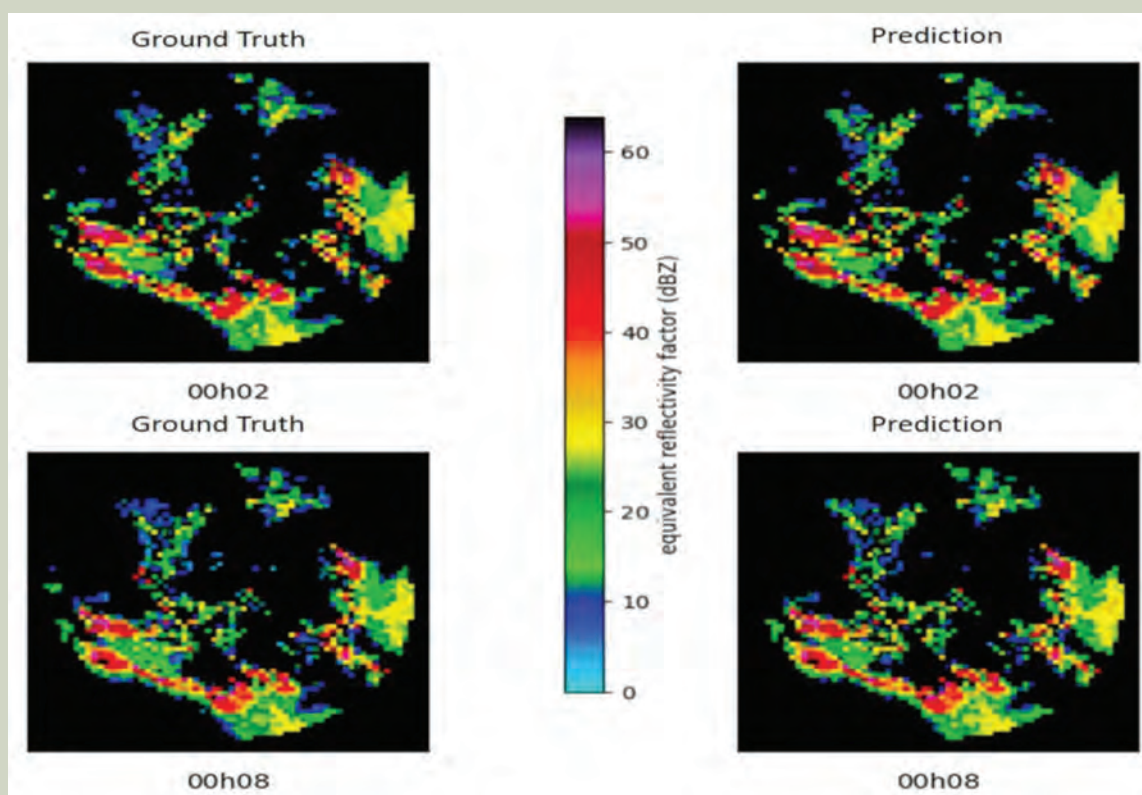


Figura 6. Previsão para 12 jun. 2018, entre 0h02 e 0h08.

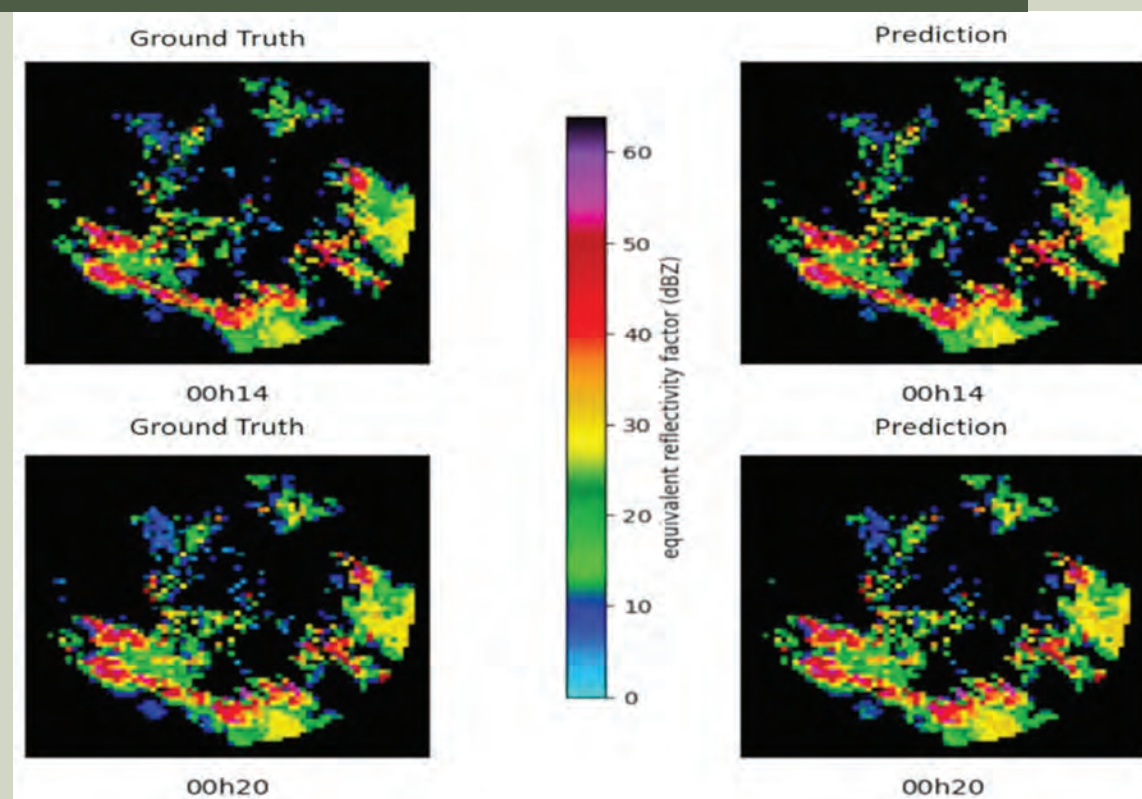


Figura 7. Previsão para 12 jun. 2018, entre 0h14 e 0h20.

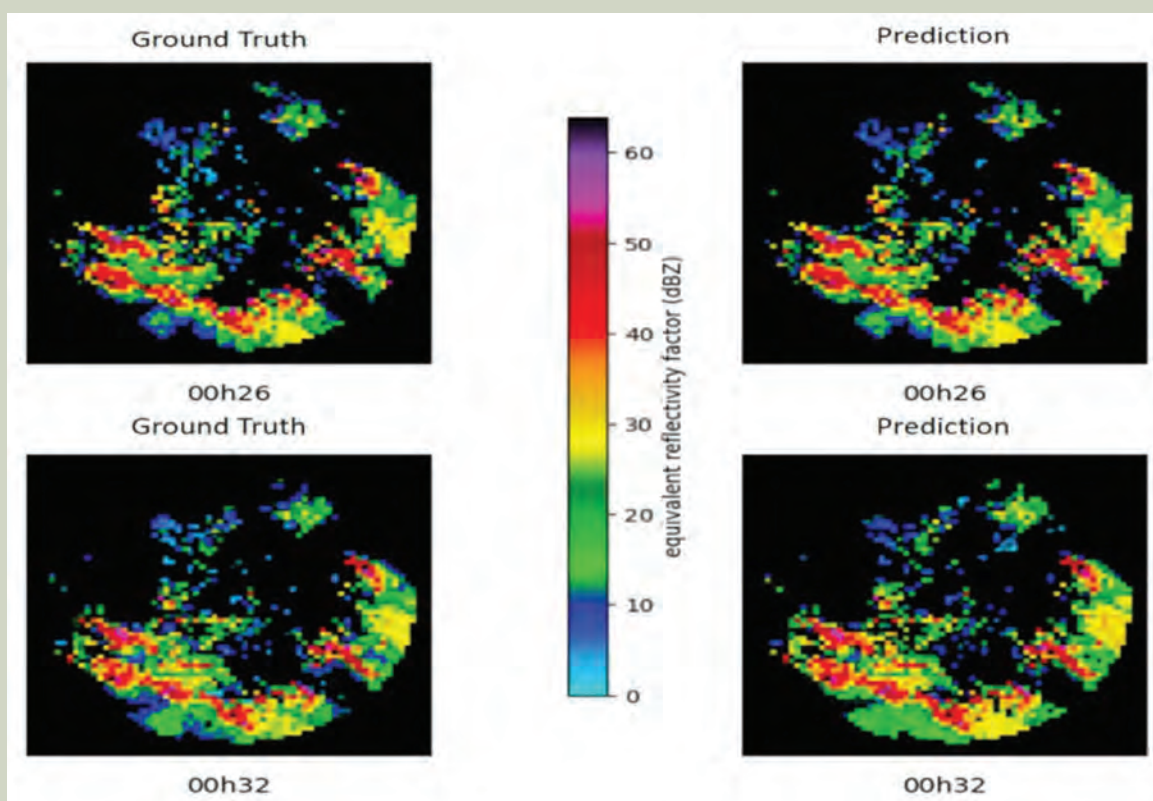


Figura 8. Previsão para 12 jun. 2018, entre 0h26 e 0h32.

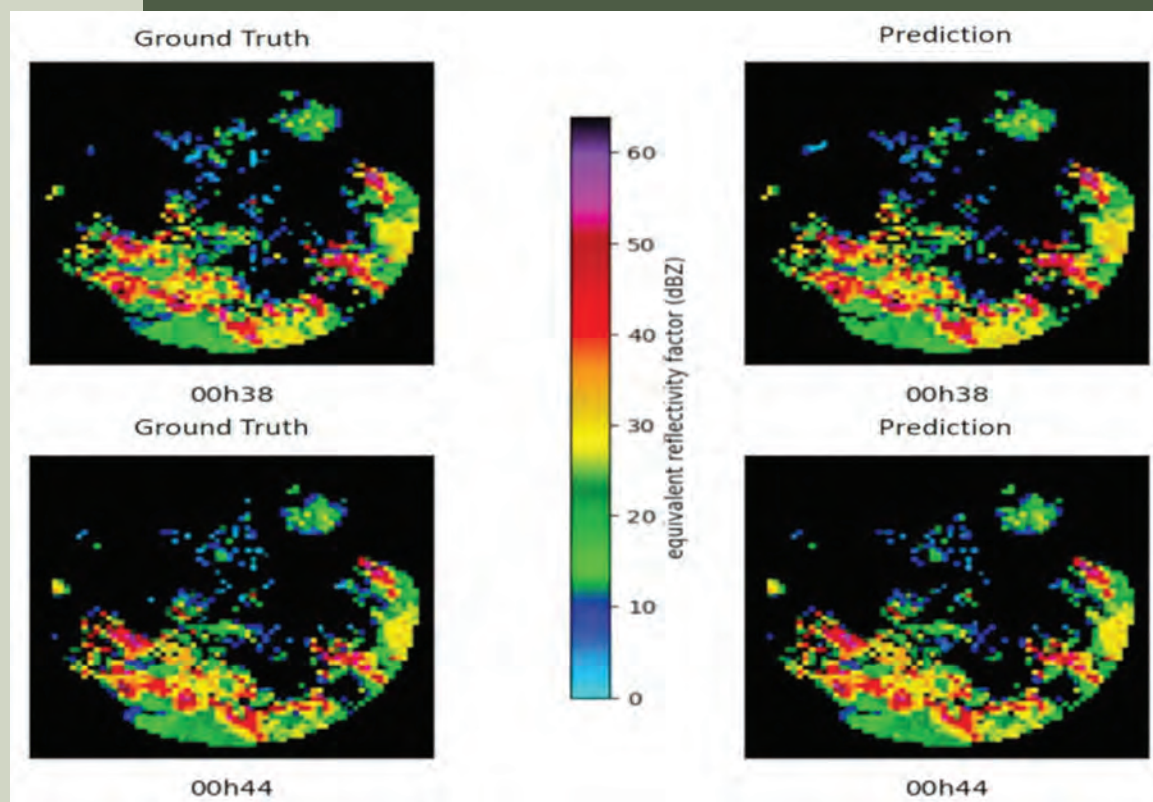


Figura 9. Previsão para 12 jun. 2018, entre 0h38 e 0h44.

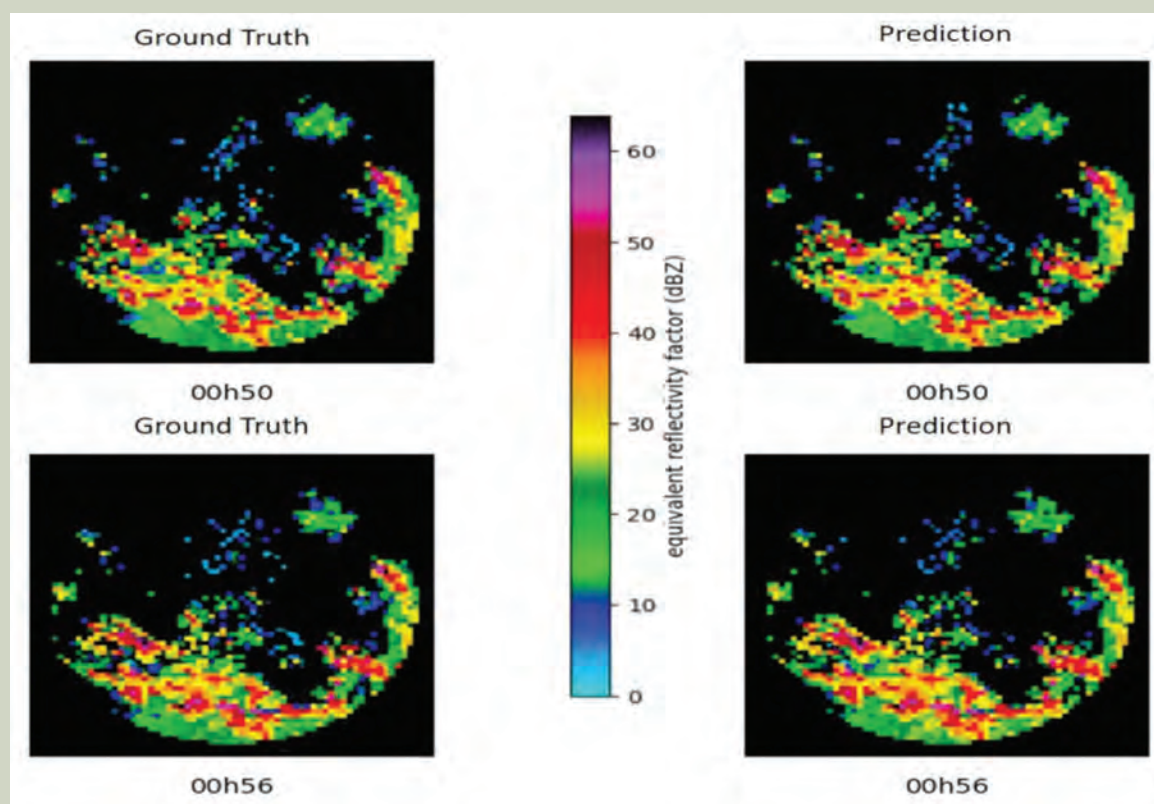


Figura 10. Previsão para 12 jun. 2018, entre 0h50 e 0h56.

A tabela de erros e similaridade serve para apresentar de maneira objetiva o que a análise subjetiva mostra ao especialista, ou seja, indica, em números, o quanto a previsão está errando e o quão similares são as imagens previstas do que realmente aconteceu a cada seis minutos.

A Tabela 1 demonstra que tanto o RMSE quanto o MAE (quanto menor o valor, mais preciso) aumentaram com o avanço do aumento do horizonte de previsão, apresentando pequenas flutuações ao longo do período. No entanto, ao examinar os resultados do SSIM, a alta similaridade de 88% revela que o modelo está capturando os padrões e características presentes nas imagens do radar. Isso sugere que, apesar das flutuações nas métricas de erro mencionadas, o modelo consegue reproduzir as características desejadas, pois quanto maior os

erros, menor é precisão da previsão gerada pela rede e, quanto maior o SSIM, mais "parecidas são as imagens", ou seja, maior é a similaridade. No caso, a similaridade é acima de 88% de um máximo de 100% e mínimo de 0%.

Tabela 1. Estatísticas de 0h02 a 0h56.

Horário	RMSE	SSIM	MAE
0h02	12,9709	0,88736	21,4673
0h08	13,8903	0,87895	22,0835
0h14	13,5702	0,88225	21,8479
0h20	13,2606	0,88474	21,7935
0h26	12,8302	0,88791	21,6133
0h32	15,7801	0,86003	23,678
0h38	13,4109	0,88346	21,1907
0h44	12,6109	0,88971	22,4774
0h50	12,6208	0,88989	20,5291
0h56	13,3004	0,88507	22,2504

Nesta parte do texto é importante lembrar ao leitor que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado, ou seja, emular a ferramenta mais

importante para o monitoramento e previsão de tempo na escala do nowcasting, a saber: o radar meteorológico. Mostrou-se que a técnica de Aprendizado de Máquina, especificamente ANN PredRNN++, dado um conjunto de imagens do passado, permite prever o futuro próximo. Entretanto, o leitor pode se perguntar sobre o sistema que assola o ambiente por onde passa, isto é, o tornado, em específico o ocorrido em Água Santa em 12 jun. 2018. Embora saibamos que tornados são imprevisíveis, apesar da experiência neste tipo de fenômeno e com as melhores tecnologias, deve-se fazer algumas observações a respeito do caso utilizado como referência.

Além da imprevisibilidade, muitas vezes é difícil afirmar se determinados danos em um cenário foram provocados por tornado. Entretanto, de acordo com Lopes e Nascimento (2020), tornados ocorrem frequentemente embebidos em sistemas de escala sinótica, como os atuantes em Água Santa no dia 12 jun. 2018, ou seja, entrada de uma frente fria (ilustrada nas linhas azul e vermelha na Figura 3), com cavado em níveis médios da atmosfera (desenhado na cor laranja na Figura 4), com ar frio e seco avançando sobre o ar quente e úmido, situação típica de frente fria. Havia também uma linha de instabilidade, conforme Figuras 6 (células vermelhas, associadas aos mais elevados dBz). Ou seja, na escala de tempo havia um cenário favorável a ventos fortes, convecção e precipitação. No monitoramento e previsão na escala do nowcasting, as imagens de radar, que por sua vez mostram um zoom na área de instabilidade, ratificam esse cenário por meio dos altos valores de dBz (refletividade). Essas características registradas pelas imagens de radar (Ground Truth) foram reproduzidas nas imagens previstas por ANN (Prediction). Portanto, esses indicativos auxiliam os previsores e tomadores de decisão, a restringirem a área de maior probabilidade

de evento severo e direcionarem seus recursos para esses locais.

6. Considerações finais

Teoricamente, a previsão do tempo tem boa precisão em um período de até 15 dias, limitada pela natureza caótica da atmosfera (Lin *et al.*, 2020). No entanto, as previsões de curto prazo (nowcasting, primeiras 3 horas) apresentam baixa precisão, pois os modelos atmosféricos demoram algum tempo para entrar em equilíbrio dinâmico. Essa pesquisa tem como objetivo propor uma alternativa para previsões nesta escala de tempo (Lorenz, 1963).

Neste trabalho, propõe-se uma rede neural para superar esse problema. Especificamente, é aplicada uma rede neural PredRNN++, descrita em detalhes em Goodfellow *et al.* (2016), um modelo que inclui neurônios recorrentes e é capaz de lidar com grandes volumes de dados, devido à natureza convolucional dessa arquitetura. A PredRNN++ foi treinada com dados de 20.000 imagens de radar meteorológico localizadas no sul do Brasil, e os resultados mostraram que a rede alcançou cerca de 90% de precisão para um período de previsão de 50 minutos. Comparando com o trabalho de Wang *et al.* (2018), sobre a PredRNN++, cuja a rede foi treinada com cerca de 108.000 imagens, e com o trabalho de Bonnet *et al.* (2020) utilizando a mesma rede treinada com 87.500 imagens, pode-se concluir que os resultados alcançados foram altamente satisfatórios. A limitação deste trabalho está no conjunto de treinamento da rede, pois a precisão da técnica é diretamente associada à quantidade e qualidade do conjunto de treinamento.

Entretanto, devemos considerar que a previsão sinótica, aquela mencionada no começo do texto, cuja precisão atinge até 98,5% para 72 horas

em algumas variáveis, nos indica a ocorrência de algum evento extremo no RS no dia 12 jun. 2018, porém a previsão por ANN, baseada em imagens e radar do passado e presente, fornece indícios ao previsor de que algum evento severo aconteceria com precisão na escala de cidades. Sabe-se que não seria possível afirmar que ocorreria um tornado ou microexplosão², mas havia fortes indícios de que um fenômeno causador de danos e prejuízos severos aconteceria nas áreas onde a refletividade esteve com maiores valores de dBZ.

Problemas complexos não têm uma solução única e nem uma solução exata, por isso a sociedade organizada precisa propor soluções em todas as áreas do conhecimento, para que os agentes públicos possam embasar suas decisões respaldadas pelo estado da arte em termos de ciência e tecnologia. Acredita-se que este trabalho seja mais um tijolo na enorme edificação, que consiste em mitigar os efeitos da nova ordem climática.

Por fim, em pesquisas futuras, os autores pretendem aumentar o horizonte de previsão, treinando a rede com um banco de dados maior, incluindo imagens de satélite e explorando estruturas de modelos neurais mais complexas e por último, mas não menos importante, transformar esta pesquisa num produto que pode ser utilizado em qualquer área do nosso planeta.

¹Na escala meteorológica, isso representa uma configuração típica de instabilidade associada a um sistema frontal frontal (Shi et al., 2015; Finn et al., 2016).

²Tornados apresentam uma corrente de ar ascendente na base da nuvem, enquanto a microexplosão é causada pelo movimento descendente das correntes de ar.

Referências

- BONNET, S. M.; EVSUKOFF, A.; MORALES RODRIGUEZ, C. A. Precipitation nowcasting with weather radar images and deep learning in São Paulo, Brasil. *Atmosphere*, v. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11111157>.
- BROWNING, K.; COLLIER, C. Nowcasting of precipitation systems. *Reviews of Geophysics*, v. 27, 1989, p. 345-370.
- BLUESTEIN, H. B. *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes: observations and theory of weather systems*. Nova York: Taylor & Francis, 1992.
- CONGLAN, C. et al. Short-term quantitative precipitation forecast experiments based on blending of nowcasting with numerical weather prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, p. 397-415. Disponível em: <https://doi.org/10.11676/qxxb2013.041>.
- DANIEL, L. O. et al. Short-term wind speed forecasting using statistical and machine learning methods. *Algorithms*, v. 13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/a13060132>.
- FINN, C.; GOODFELLOW, I.; LEVINE, S. Unsupervised learning for physical interaction through video prediction. *Advances in Neural Information Processing Systems*, v. 29, 2016.
- GOODFELLOW, I. J.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep learning*. The MIT Press, 2016.
- GREFF, K. et al. LSTM: a search space odyssey. *Ieee Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, v. 28, 2016, p. 2222-2232.
- GUTIERREZ-COREA, F. V. et al. Forecasting short-term solar irradiance based on artificial neural networks and data from neighboring meteorological stations. *Solar Energy*, v. 134, 2016, p. 119-131. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.020>.
- HOCHREITER, S.; SCHMIDHUBER, J. Long short-term memory. *Neural Computation*, v. 9, 1997, p. 1735-1780.
- HOCHREITER, S. The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, v. 6, 1998, p. 107-116.
- HOLTON, J. R. An introduction to dynamic meteorology. *American Journal of Physics*, v. 41, n. 5, 1973, p. 752-754.
- INPE. São Paulo. Satélites brasileiros para coleta de dados ambientais serão lançados de base nacional. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2024.
- IPCC. Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Genebra: IPCC*, 2023. Disponível em: <https://10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>.
- LECUN, Y. et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural Computation*, v. 1, 1989, p. 541-551.
- LIN, H. H. et al. Multi-weather evaluation of nowcasting methods including a new empirical blending scheme. *Atmosphere*, v. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11111166>.
- LOPES, M. M.; NASCIMENTO, E. L. Use of remote sensing via satellite in the identification of tornado damage paths in a severe weather event in Rio Grande do Sul. *Ciência Natura*, v. 42, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X5530>.
- LORENZ, E. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 20, n. 2, 1963, p. 130-141.
- PASCANU, R.; MIKLOV, T.; BENGIO, Y. On the difficulty of training recurrent neural networks. *International Conference on Machine Learning*, 2013, p. 1310-1318.
- SASSER, C.; YU, M.; DELGADO, R. Improvement of wind power prediction from meteorological characterization with machine learning models. *Renewable Energy*, v. 183, 2022, p. 491-501.

- SHI, X. *et al.* Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*, v. 28, 2015.
- SHI, X. *et al.* *Deep learning for precipitation nowcasting: a benchmark and a new model*. 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1706.03458>.
- TOTH, Z.; BUIZZA, R. Weather forecasting: what sets the forecast skill horizon? ROBERTSON, A. W.; VITART, F. (Eds.). *Sub-seasonal to seasonal prediction*. 1 ed. Elsevier, 2019, p. 17-45. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811714-9.00002-4>.
- TUYEN, D. N. *et al.* RainPredRNN: a new approach for precipitation nowcasting with weather radar echo images based on deep learning. *Axioms*, v. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/axioms11030107>.
- VERDELHO, F. *et al.* Quantitative precipitation estimation using weather radar data and machine learning algorithms for the Southern Region of Brazil. *Remote Sensing*, v. 16, 2024, p. 1-20. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16111971>.
- WANG, Y. *et al.* *PredRNN++: towards a resolution of the deep-in-time dilemma in spatiotemporal predictive learning*. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1804.06300>.
- WMO. *Guidelines for nowcasting techniques*. 2017. Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/55666>

Equipe de trabalho

Fabício Pereira Harter
Doutor em Computação Aplicada e Professor da UFPEL

Leonardo Calvetti
Doutor em Meteorologia e Professor UFPEL

Elcio Hideiti Shiguemori
Doutor em Computação Aplicada e Pesquisador
da Força Aérea Brasileira

Felipe Copceski Rossatto
Doutorando em Modelagem Matemática UFPEL





Estrutura produtiva e sustentabilidade: trajetória e desafios da economia gaúcha no contexto das mudanças climáticas

HÉLIO HENKIN
CARLOS SCHÖNERWALD
LUIZA PECIS VALENTI
LISIANE DE SOUZA NUNES DE MOURA





RESUMO

O artigo analisa a relação entre estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável, com foco no Rio Grande do Sul (RS) e no contexto dos problemas ambientais e impactos dos eventos climáticos extremos ocorridos em 2023-24. Diante das evidências recentes da literatura acerca dos efeitos das mudanças da estrutura produtiva sobre indicadores de sustentabilidade ambiental, busca-se analisar os caminhos e desafios que se apresentam para o estado, a partir da caracterização da evolução da estrutura produtiva do Rio Grande do Sul no quadro da região Sul e Brasil, e dos problemas do baixo dinamismo macroeconômico ao longo das últimas décadas. Com base na análise dos dados e na proposição de esquema analítico que articula os conceitos de estrutura produtiva, sustentabilidade e resiliência transformativa, discutem-se as alternativas para a política de desenvolvimento produtivo no estado, tendo em consideração as possibilidades e restrições no quadro brasileiro.



Maurício Tonetto/Secom RS

Áreas de plantio comprometidas pela enchente.

Introdução

O presente artigo busca analisar a relação entre estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável, com foco no Rio Grande do Sul e no contexto dos problemas ambientais e dos impactos dos eventos climáticos extremos ocorridos em 2023-24. A economia gaúcha carrega tanto as marcas de sua inserção na economia brasileira quanto as da sua formação nos aspectos socioculturais, produtivos e geográficos. Quando se analisam os eventos climáticos extremos, bem como impactos ambientais sobre o dinamismo econômico do

RS, tais marcas estão presentes nos efeitos sobre a renda, emprego e capital físico, bem como na sua capacidade de resposta e recuperação.

A estrutura produtiva é uma das principais dimensões de um sistema econômico. A composição setorial e a participação relativa dos diferentes ramos de atividade econômica resultam de processo de desenvolvimento produtivo no longo prazo. Ao mesmo tempo, tais características estruturais são determinantes do ritmo de crescimento da renda *per capita* e, de modo geral, do desenvolvimento econômico

de uma região ou país. Mais recentemente, conforme será visto na sequência, tem sido evidenciado que a estrutura produtiva também exerce efeitos sobre as condições de desenvolvimento sustentável: diferentes perfis de estrutura produtiva geram distintos atributos de sustentabilidade do processo de desenvolvimento.

No caso do RS, a estrutura produtiva consolidou-se ao longo do processo de transformação da economia brasileira no século XX. Ainda que o centro dinâmico das mudanças se localizasse em São Paulo, a economia gaúcha alcançou padrão elevado de renda na posição nacional, que se firmou até a virada de século: no período 2000-2021, o RS situou-se na 5ª posição no ranking do PIB *per capita* estadual. Em termos de valor adicionado setorial *per capita*, no mesmo período, o RS ocupou a 4ª posição na indústria de transformação, a 5ª posição em comércio e serviços e a 6ª posição na produção agropecuária e extrativa. Em termos de competitividade exportadora, o estado também se destaca: das 28.524 empresas exportadoras do Brasil em 2023, 3.254 eram gaúchas, correspondendo a 11,4% do total, proporção maior do que a participação do RS no PIB brasileiro. Ali se desenvolveu também um sistema robusto de ciência e tecnologia e inovação (C, T&I). No relatório de 2024 do Índice Brasil de Inovação e Desenvolvimento (Ibid), elaborado pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Inpi), o RS é o 5º estado mais inovador no índice geral, sendo 2º lugar nos pilares Negócios e Conhecimento & Tecnologia¹.

No que se refere à diversificação e à sofisticação produtiva, o RS alcançou resultados importantes em termos da composição setorial da sua estrutura e da participação do estado na atividade produtiva em vários segmentos, de

produtos alimentícios e bebidas (incluindo os avanços na produção vinícola) a bens e serviços avançados nas áreas da indústria mecânica e eletrônica. Com relação ao total de vínculos empregatícios, embora a agroindústria (indústrias de alimentos e bebidas) tenha liderança em termos de participação setorial na atividade produtiva estadual, com cerca de 16%, há segmentos importantes que revelam um grau de diversificação que se destaca no cenário nacional. Por exemplo, podem ser salientados os seguintes segmentos com respectivas participações para o ano de 2022: Saúde e Bem-Estar (7,21%), Metal Mecânico (6,87%), Moda (6,51%), Construção (6,39%), Turismo (5,66%), Automotivo (2,82%), Tecnologia da Informação (2,64%), Móveis (1,89%), Serviços Financeiros (1,82%) e Comércio Varejista (1,52%)².

Se, por um ângulo, o RS consolidou no longo prazo uma estrutura produtiva que se destaca *no contexto nacional pela diversificação e inovação*, por outro ângulo a economia do Rio Grande do Sul, ao longo das últimas duas décadas, apresentou baixo dinamismo em comparação ao Brasil e à região Sul, com taxas de crescimento inferiores e com mais fortes oscilações. Entre 2012 e 2023, a taxa média de crescimento da economia gaúcha foi de 1,72% ao ano, diante de 2,05% para o Brasil. Com isto, tem ocorrido uma tendência de redução da participação no PIB brasileiro. Em 2000, o estado contribuía com 7,4% do PIB nacional, atingindo o seu pico em 2001, com 7,46%. A partir de então, a participação passou a oscilar numa faixa entre 5,9% e 6,5% do PIB nacional.

O estado experimentou anos de expressivo crescimento, como em 2003 (6%) e 2007 (7%), mas também enfrentou quedas acentuadas, como em 2002 (-6%) e 2020 (-8%). É importante observar que essas oscilações coincidem com eventos climáticos extremos: em anos de estiagem o PIB tem sofrido queda substancial,

pelos efeitos diretos e indiretos das perdas ocorridas na produção agropecuária. Segundo o Atlas Socioeconômico do RS, nos anos de 2005 e 2020 a estiagem foi severa, 425 e 431 ocorrências, o PIB nos dois períodos sofreu retração de 3% e 8%, respectivamente³.

Um dos fatores do baixo dinamismo do RS está associado ao problema da desindustrialização prematura. Entre 2010 e 2020, a participação da indústria no valor adicionado total do estado diminuiu consideravelmente. A indústria de transformação gaúcha sofreu redução de 8,5% entre 2010 e 2019, com nova retração de 4,8% em 2020. É importante observar, entretanto, que o problema da desindustrialização tem uma dimensão nacional, afetando os demais estados do Brasil, especialmente SP e outros estados industrializados⁴.

Mais específico ao RS é o problema do baixo grau de investimentos na comparação com outros estados brasileiros e principalmente aos demais estados da região Sul (SC e PR). Enquanto estes alcançaram uma proporção média do investimento em relação ao PIB de 19% e 20% respectivamente, na década de 2010, o Rio Grande do Sul manteve-se abaixo da média nacional de 17,7%, com um índice de apenas 15%. Em parte, essa diferença pode ser atribuída à maior capacidade dos estados vizinhos em realizar investimentos públicos, voltados à formação de infraestrutura produtiva. Em média, entre 2015 e 2022, o RS investiu menos de R\$ 1 bilhão por ano, enquanto os demais estados da região Sul mantiveram investimentos públicos próximos a R\$ 2 bilhões anuais, uma disparidade que evidencia a dificuldade do estado em acompanhar o ritmo de investimento público necessário para fomentar sua competitividade⁵.

Esse quadro revela tanto atributos positivos (a estrutura produtiva formada ao longo de

várias décadas de desenvolvimento brasileiro) quanto problemas (o baixo dinamismo recente, que corresponde a uma performance macroeconômica insatisfatória) e remete a reflexões sobre as possibilidades e limitações da resposta aos problemas climáticos que têm afetado o RS, bem como aos desafios do desenvolvimento sustentável que se ampliam em escala global. Em primeiro lugar, é pertinente indagar se uma economia com menor dinamismo e com baixo investimento público como proporção do dispêndio total terá condições apropriadas de adotar práticas de prevenção e ações de reparação diante da maior frequência de eventos climáticos extremos e das perdas por esses acarretadas, nos diversos aspectos da vida social e economia da sua população. Em segundo lugar, e mais diretamente relacionado com o objetivo deste artigo, as características e atributos da estrutura produtiva do RS simultaneamente sofrem os impactos dos eventos extremos e afetam as condições de desenvolvimento sustentável⁶ no âmbito regional.

No primeiro caso, como exemplo, podem ser lembrados os problemas de logística das cadeias produtivas afetadas pelas enchentes, diretamente e indiretamente, com a destruição de pontes e estradas e a suspensão das operações do aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, como ocorreu em 2024. No segundo caso, trata-se dos diferentes níveis de degradação ambiental e de capacidade de geração de recursos para uma trajetória de sustentabilidade nos diferentes setores dentro da diversidade produtiva do estado. Com relação a esse ponto, cabe fazer aqui uma primeira referência a uma tendência importante da literatura e pesquisa internacional, e que se relaciona com o objetivo deste trabalho. Trata-se dos estudos empíricos recentemente realizados, revelando uma correlação positiva entre estruturas

produtivas diversificadas e indicadores de desenvolvimento sustentável. Essas evidências estão na base do objetivo, das questões de pesquisa e da hipótese deste artigo.

O artigo trata o tema da resiliência e da sustentabilidade da economia gaúcha de forma complementar aos necessários estudos sobre impactos de curto prazo e sobre a capacidade local-regional de prevenção e mobilização de recursos emergenciais para o enfrentamento de eventos extremos. Trata-se de uma perspectiva que contempla a trajetória de longo prazo da economia gaúcha, incorporando as tendências da literatura recente que investiga as relações entre estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável. O objetivo do trabalho é analisar as relações entre as características da estrutura produtiva do RS, em conjunto com os problemas de dinamismo macroeconômico estadual, e as condições de desenvolvimento sustentável, no contexto da intensificação dos eventos climáticos extremos, com base nos estudos teóricos e empíricos mais recentes.

As principais questões que norteiam a pesquisa, a partir do enunciado desse objetivo, são as seguintes: a) no cenário de alteração das condições ambientais e maior frequência dos eventos extremos, qual a situação da economia gaúcha, em termos agregados e estruturais? b) com base nas análises e evidências internacionais de correlação entre estrutura produtiva e sustentabilidade, o que se pode projetar para o caso do Rio Grande do Sul em termos de desafios das políticas de desenvolvimento e sustentabilidade? c) a diversificação da estrutura produtiva do RS mostra-se destoante das tendências macrorregionais e nacionais? Ou são outros os fatores que comprometem o crescimento da economia gaúcha, e em consequência também a sua resiliência e as condições de desenvolvimento sustentável?

Trata-se de avaliar se a economia do Rio Grande do Sul apresenta características e potencialidades que se alinham à correlação positiva evidenciada entre diversificação produtiva, renda *per capita* e sustentabilidade, e se há outros traços econômicos que comprometem a busca de desenvolvimento sustentável. Em outros termos, considerando o cenário nacional, as limitações do desenvolvimento sustentável da economia gaúcha estão mais associadas à composição setorial da sua estrutura ou aos problemas que afetam o dinamismo da sua economia como um todo? *A hipótese de trabalho é a seguinte: apesar da perda de dinamismo, a estrutura produtiva do RS ainda se mantém com características próximas aos estados mais avançados, com maior diversificação e com maior potencial de desenvolvimento sustentável, desde que reverta tendências da sua performance macroeconômica.*

Ainda à guisa de introdução, é importante abordar a questão da resiliência regional. O uso do termo resiliência expandiu-se de forma mais rápida do que a sua operacionalização para a formulação de políticas públicas. Sua gênese está associada à utilização de paradigmas evolucionários em diversos campos de pesquisa científica, associados à noção de sistemas complexos *adaptativos* (SCAs, incluindo sistemas socioecológicos, psicologia, economia, entre outros), aos quais não são suficientes abordagens baseadas em equilíbrio e linearidade.

De modo geral, resiliência é tida como um atributo dos SCAs: sua capacidade de adaptação, recuperação e reorganização diante de choques adversos ou perturbações. No caso dos sistemas regionais, a ênfase maior dos estudos foi dada usualmente aos fatores econômicos. Todavia, o tema da mudança climática e dos eventos climáticos extremos tem sido objeto de



Rafa Neddemeyer/Agência Brasil

Comerciantes retiram entulho e limpam lojas para retomar negócios no Centro Histórico de Porto Alegre.

interesse crescente em termos de seu impacto sobre as economias regionais. Nesse contexto, Martin e Sunley (2014) definem resiliência dos sistemas socioeconômicos regionais como sua capacidade de resistir ou se recuperar de choques de mercado, competitivos e ambientais, eventualmente via adaptações na sua estrutura produtiva e arranjos socioinstitucionais, de tal modo que se restaure a trajetória de desenvolvimento anterior ou se ingresse em nova trajetória de desenvolvimento sustentável, com a utilização mais completa e produtiva dos seus recursos físicos, humanos e ambientais⁷.

Os estudos regionais dão ainda mais ênfase à diversificação produtiva. Nesses enfoques, a capacidade de adaptação das estruturas industriais, tecnológicas, da força de trabalho e das instituições da região é o que determinará a trajetória de longo prazo da economia regional. O desafio consiste em ajustar essas estruturas às pressões competitivas, tecnológicas e de mercado que emergem em um ambiente global em rápida transformação. Como observam Martini (2020) e Simmie e Martin (2010), a resiliência econômica depende da flexibilidade dessas estruturas

em responder a novas demandas, seja através da diversificação das indústrias existentes ou da criação de novos setores produtivos que respondam às oportunidades tecnológicas e ambientais emergentes.

Neste artigo adaptam-se as definições e taxonomias, propondo-se os seguintes tipos de resiliência. *Resiliência Operacional* é a capacidade da economia regional de reagir a choques adversos e retomar a trajetória anterior ao choque, sem alterações substanciais na sua estrutura produtiva, mantendo os ritmos anteriores de desenvolvimento socioeconômico e de padrões de sustentabilidade. Em contraste, *Resiliência Transformativa* é a capacidade da economia regional de reagir a choques adversos, adotando inovações tecnológicas e organizacionais que alterem e qualifiquem sua estrutura produtiva, propiciando mais dinamismo econômico, bem-estar social e sustentabilidade e reduzindo hiatos em relação ao benchmarking internacional. Sob esse enfoque, *Resiliência Transformativa* envolve a capacidade que uma região demonstra de prosseguir em trajetória de mudança estrutural com ênfase em diversificação e sofisticação produtiva, aumentando a participação de setores que adotam tecnologias mais sustentáveis e que no conjunto contribuam para uma menor degradação ambiental.

Para tratar dessas questões, as seções subsequentes estão assim organizadas: a seção 2 contempla marcos conceituais-analíticos sobre estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável. A seção 3 contempla indicadores da economia gaúcha, acerca de sua performance nas circunstâncias dos eventos climáticos e da evolução de suas características estruturais, nos termos dos marcos conceituais-analíticos adotados. A seção 5 encaminha a considerações finais e implicações de políticas públicas.

2. Estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável: conceitos, definições e proposição de arcabouço analítico para a formulação de políticas públicas

2.1. Estrutura produtiva, renda *per capita* e sustentabilidade: evidências empíricas

As pesquisas sobre desenvolvimento econômico revelam a importância do perfil da estrutura produtiva de países e regiões como fator correlacionado à elevação do padrão de vida e do bem-estar da população. O ponto de partida para essa constatação foram estudos que evidenciaram que a ampliação da diversificação da estrutura produtiva é uma condição importante para a trajetória de elevação da renda *per capita*. Em estudo empírico seminal, Imbs e Warcziag (2003) utilizaram a exportação de bens e serviços na relação com a renda *per capita* e encontraram o seguinte resultado: numa primeira etapa de elevação do nível de renda dos países, o grau de diversificação das exportações aumenta. Numa segunda etapa, após atingir um ponto de máxima diversificação, a cesta de produção exportada volta a ser mais especializada, formando o que os economistas chamam de uma curva em formato U⁸. Uma explicação para essa trajetória é que um país com renda maior tende a ser mais capaz de disputar os mercados internacionais, o que propicia oportunidades de ampliar os volumes de exportação nos setores de maior vantagem competitiva, o que elevaria o grau de concentração da produção, após uma primeira etapa de diversificação crescente. De qualquer modo, a diversificação produtiva é fundamental no processo de elevação da renda *per capita* e desenvolvimento econômico dos países.

Em estudos posteriores, Hidalgo *et al.* (2007) e Hidalgo e Hausmann (2009) confirmaram a correlação entre nível de renda e diversificação. Nesses estudos, não se observou o ponto de inflexão a partir do qual o aumento da renda interna seria acompanhado de uma reversão em direção a mais especialização e concentração da estrutura produtiva. Em outras palavras, nesse caso não haveria uma curva em U a representar o processo de desenvolvimento: a renda *per capita* aumentaria continuamente com o aumento e estabilização do grau de diversificação da estrutura produtiva⁹.

Bahar *et al.* (2016) avançam na análise da dinâmica de diversificação no espectro de média a alta renda, ampliando a investigação empírica, com maior desagregação dos dados, passando do nível de setor para variedades de produtos. Concluem que a correlação entre diversificação e nível de renda *per capita* ocorre tanto em setores quanto em variedades de produtos dentro de cada setor. As evidências empíricas confirmam que a concentração diminui à medida em que a renda aumenta, estabilizando-se posteriormente, quando se atinge nível de renda médio e alto. O formato da curva que relaciona nível de renda *per capita* e grau de concentração da estrutura produtiva é em L e não em U. As evidências empíricas também mostram que os países mais ricos diversificam a produção dentro dos ramos setoriais, estabelecendo também um aumento da sofisticação produtiva (isto é, produtos com maior conteúdo tecnológico e com mais valor adicionado por unidade). As novas evidências detectam que o processo de *reespecialização* em países de renda mais alta, isto é, de uma reversão no processo de diversificação, ocorre somente para países intensivos em recursos naturais.

A preocupação crescente com o tema da sustentabilidade estimulou a realização de

estudos empíricos para detectar não apenas a relação entre estrutura produtiva e nível de renda *per capita*, mas também entre estrutura produtiva e grau de desenvolvimento sustentável. Esses estudos, embora dominantes na literatura econômica, são limitados pela restrição de dados quantitativos, de tal modo que a noção de desenvolvimento sustentável fica representada de forma reducionista por indicadores do tipo emissão de gases de efeito estufa.

De toda forma, uma das vertentes dos estudos sobre desenvolvimento sustentável é a análise da curva de Kuznets ambiental (CKA)¹⁰. A CKA é inspirada na relação entre crescimento econômico e desigualdade proposta pelo economista Simon Kuznets em meados do século XX, mas propõe uma relação distinta, entre trajetória da renda de um país e sua degradação ambiental, medida pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Essa relação foi estimada por Grossman e Krueger (1991, 1995) para vários países. O resultado observado foi uma curva CKA em formato U invertido, o que implica a seguinte associação: primeiro, a degradação ambiental aumentaria junto com a renda; mas, à medida que essa renda se elevasse, essa tendência seria revertida. Assim, uma visão otimista se formou logo no início dos anos 90: o crescimento do PIB e o progresso tecnológico seriam compatíveis com a sustentabilidade ambiental. Inicialmente, na transição de baixa renda para renda média, há um aumento da degradação ambiental, mas na transição para a alta renda, os indicadores de degradação ambiental seriam reduzidos¹¹.

Nos anos seguintes, porém, novos estudos apontaram limitações metodológicas nos estudos pioneiros (ver Stern e Common, 2001) ou chegaram a outras conclusões no plano empírico (Harbaugh *et al.*, 2002). Cerca de trinta anos após os primeiros estudos sobre

CKA, não há conclusões estabelecidas sobre a relação entre nível de renda per capita e degradação ambiental, embora a maior parte dos estudos econométricos propiciem sustentação para a CKA em formato de U invertido¹².

Por outro lado, tem havido avanços na perspectiva teórico-conceitual, no sentido de explicar os fundamentos que podem determinar os formatos da CKA (ver Andreoni e Levinson, 2001 e Stern, 2004). Em particular, o estudo de Stern (2004) propôs um esquema conceitual de efeitos econômicos e tecnológicos que levam em conta a estrutura produtiva, e que é importante para o objetivo do presente trabalho: 1) na primeira fase do processo de expansão da renda per capita, não há avanços tecnológicos suficientemente compensadores na forma de produzir e predomina um *efeito escala*; a demanda por recursos naturais e a poluição se eleva com o *tamanho maior* da economia; 2) na segunda fase, há um *efeito composição*: a renda per capita aumenta, intensifica-se a produção agrícola e a industrialização, o que continua gerando degradação ambiental, até que a *composição setorial* se altera no sentido de setores de serviços e industriais com menor geração de poluentes. A mudança na estrutura econômica de indústrias intensivas em energia para intensivas em tecnologia baseadas em conhecimento é o fator que provoca o ponto de inflexão da CKA; 3) a terceira fase é a do *efeito técnico*: países que chegam a níveis de renda mais altos produzem com tecnologias mais limpas, o que leva a movimentos simultâneos de elevação da renda *per capita* e redução da degradação ambiental.

Na revisão de literatura feita por Guo e Shabazz (2024), foram encontrados resultados compatíveis com a curva CKA em outro formato, representado pela letra N: após a

fase do *efeito técnico*, a elevação da renda *per capita* prossegue e o *efeito escala* volta a predominar. O aumento da produção de bens e serviços supera os *efeitos de composição e técnico*, provocando novamente piora das condições ambientais. A partir daí, a redução do crescimento econômico e a obsolescência tecnológica reforçam os mecanismos de degradação ambiental.

Os estudos teóricos e empíricos sobre a curva CKA tornaram-se paradigma de análise das relações entre distintos indicadores da economia e do meio ambiente. Nesse processo, a CKA passou à condição de ferramenta de análise poderosa para orientar a formulação de políticas públicas, ganhando relevância a partir das mudanças climáticas e da preocupação com a emissão de dióxido de carbono e outros GEE¹³.

O estudo da correlação entre estrutura produtiva e sustentabilidade ampliou-se com a abordagem da Complexidade Econômica, que contempla os atributos e competências tecnológicas e produtivas que permitem a um país produzir em uma diversidade maior de setores e ao mesmo tempo produzir produtos que não são amplamente produzidos por grande número de países¹⁴. O uso dos índices de Complexidade Econômica (ECI) viabilizou a análise das relações entre a composição setorial da estrutura produtiva dos países e indicadores de sustentabilidade ambiental. Os estudos mais recentes detectam correlação inversa entre complexidade econômica e nível de emissões de CO₂ e sustentam que economias mais complexas têm maior possibilidade de formar competências para reduzir a poluição e produzir mais eficientemente.

Os estudos apresentam limitações, pois em geral utilizam apenas uma variável relativa à sustentabilidade ambiental (emissão de CO₂). Além disso, é difícil distinguir o efeito

da complexidade econômica, que tenderia a incorporar produtos com tecnologias menos danosas ao meio ambiente, do efeito de melhorias tecnológicas que se difundem em vários setores, reduzindo a emissão de poluentes e a degradação ambiental. De qualquer modo, os estudos indicam que, *na trajetória de desenvolvimento econômico, não é apenas a diversificação produtiva que propicia ganhos de sustentabilidade ambiental; é necessário que o mix de produtos no país seja mais diversificado e com maior presença de sofisticação produtiva.*

2.2. Políticas de desenvolvimento econômico sustentável: proposição de arcabouço analítico

A principal resposta encontrada até então para os problemas ambientais decorrentes do desenvolvimento do capitalismo foi a regulamentação. Das primeiras leis que tornaram mais rígidas as normas para fins de licenciamento até a utilização dos mecanismos de mercado de licenças de emissão, foram colocados limites à emissão de poluentes. Esses limites constituíram um mecanismo de restrição e ao mesmo tempo de estímulo à inovação, “de fora para dentro” do sistema produtivo. Numa primeira instância, detectam-se os impactos ambientais de atividades produtivas específicas, os quais se enquadram no conceito de externalidades na teoria econômica¹⁵. Diante dessas externalidades, são adotadas normas e leis que condicionam o processo produtivo. Na sequência, a adoção contínua de inovações, capazes de lidar simultaneamente com o desafio de produzir e o de controlar as externalidades da atividade produtiva, é tida como o caminho para a “fórmula da sustentabilidade”: aos governos bastaria avaliar o grau de danos ambientais tolerados e tornar efetivo os mecanismos institucionais e os mecanismos

de inovação compatíveis com o progresso material e bem-estar.

Desde o final do século XX, entretanto, um quadro mais complexo se constituiu, com o avanço da capacidade produtiva de bens e serviços em novas regiões, a formação de cadeias globais de valor, a intensificação dos sistemas de transporte internacional, as mudanças climáticas e a intensificação de eventos extremos. Esse novo quadro tem colocado em xeque a tradicional “fórmula da sustentabilidade”. Como indicam as evidências mais recentes, é fundamental avaliar a composição setorial da estrutura de produção, na medida em que diferentes conjuntos de bens e serviços geram distintos impactos ambientais e perspectivas para o desenvolvimento sustentável. Em síntese, não se trata apenas de o quanto produzir (com maior ou menor imposição de normas regulatórias); *o que se produz* também importa (na perspectiva do desenvolvimento sustentável).

Nesse sentido, os efeitos do progresso econômico sobre as condições ambientais e a intensificação das mudanças climáticas requerem novas perspectivas para a formulação de políticas de desenvolvimento sustentável. A problemática atual aponta para a necessidade de políticas orientadas pela ideia de *coevolução da estrutura produtiva do sistema econômico regional e do ambiente sistêmico*. Sob esse enfoque, o aumento da frequência de eventos climáticos extremos e as mudanças do ambiente sistêmico precisam ser internalizados nas decisões relativas à estrutura produtiva regional, em duas direções: as características da estrutura produtiva produzem diferentes efeitos sobre o meio ambiente e sobre as possibilidades de desenvolvimento sustentável; por outro ângulo, as mudanças no meio ambiente passam a exigir maior capacidade de adaptação e de transformação da estrutura de produção.

Adotar um arcabouço analítico baseado na *coevolução da estrutura produtiva regional e do ambiente sistêmico* amplo requer a consideração de conceitos associados ao desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental. O termo *coevolução* aqui empregado tem o significado adotado a partir da abordagem da economia evolucionária, como em Nelson (1994): a dimensão física da tecnologia (a mudança produtivo-tecnológica) e a dimensão social da tecnologia (as mudanças institucionais) consolidam-se no sistema socioeconômico a partir de suas interrelações. Sob esse prisma, a ideia central é de que a estrutura produtiva de determinada região, nos seus aspectos quantitativos e qualitativos (o mix de produtos, setores e graus de sofisticação produtiva) interage continuamente com o ambiente sistêmico amplo que a cerca (isto é, os elementos da infraestrutura produtiva, do aparato legal regulatório e as dotações e condições dos ecossistemas naturais). Destacam-se aqui, além dos tradicionais fatores sistêmicos, os impactos e respostas à intensificação das mudanças do meio ambiente e da frequência dos eventos extremos.

A Figura 1 representa esse enfoque de forma esquemática. A mudança da estrutura produtiva deve se orientar não somente para a melhoria da renda *per capita*, mas também pela necessidade de responder aos desafios do ecossistema natural, que deixam de ser tratados como eventos isolados e exógenos, e passam a ser elementos endógenos ao sistema. Por exemplo, a decisão de investir em empreendimentos que reduzam a emissão de gases de efeito estufa e ao mesmo tempo apresentem mecanismos de proteção diante de secas ou inundações corresponde a um mecanismo decisório em que as alterações do meio ambiente natural são variáveis endógenas. Isto é, tais alterações devem ser

continuamente consideradas nos processos em que a ação econômica se traduz em uma intervenção no meio ambiente. Em contraste, ações de reconstrução pós-eventos extremos tomados como fatos isolados tratam as mudanças no ambiente como externalidades eventuais e exógenos ao sistema de decisões na esfera econômica e produtiva.

Essa proposição visa contribuir para a superação das limitações das abordagens da política de desenvolvimento sustentável baseadas no que aqui se denominou “fórmula da sustentabilidade”, que lida com o problema ambiental como externalidades, isto é, como elementos predominantemente exógenos ao processo de desenvolvimento econômico. Na seção 4, essa proposição será retomada no contexto das sugestões para o enfrentamento dos desafios econômicos e ambientais para o Rio Grande do Sul.

3. A evolução da economia gaúcha¹⁶ e os eventos climáticos extremos: performance macroeconômica estadual e configuração atual da estrutura produtiva

3.1. Desempenho macroeconômico estadual e implicações no contexto dos eventos climáticos extremos

O Gráfico 1 mostra o índice do Produto Interno Bruto do Rio Grande do Sul, dos estados vizinhos de Santa Catarina e Paraná e do Brasil, tendo como base comum o ano 2000. A escolha dos estados do PR e SC para comparação deve-se ao fato de que, além da proximidade na região Sul, são estados que compartilham muitas características comuns ao longo do processo de desenvolvimento, especialmente

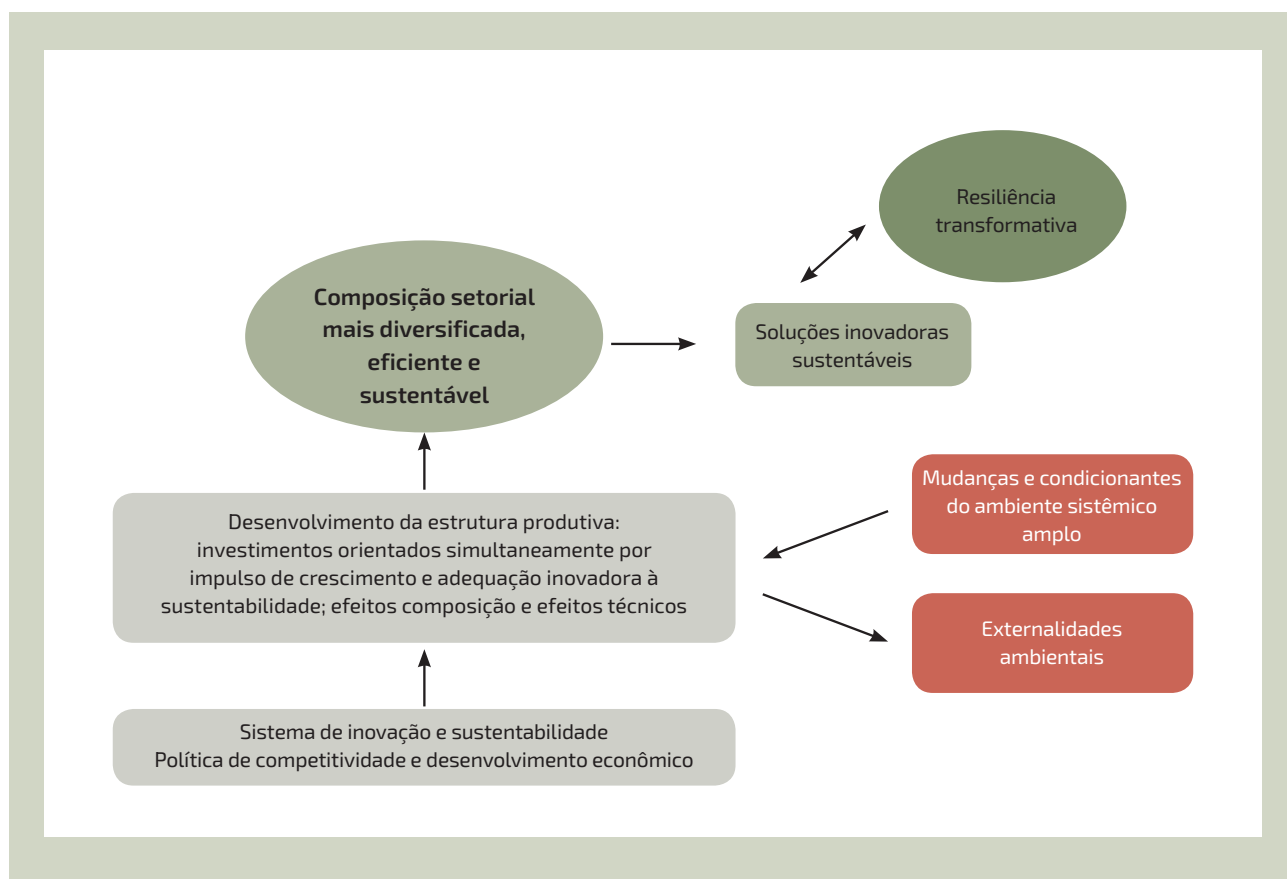


Figura 1. Dinâmica da coevolução da estrutura produtiva e do ambiente sistêmico e natural
 Fonte: elaboração dos autores.

no século XX, incluindo aspectos sociais, demográficos, nível de renda *per capita* e traços de similaridade no desenvolvimento da estrutura produtiva.

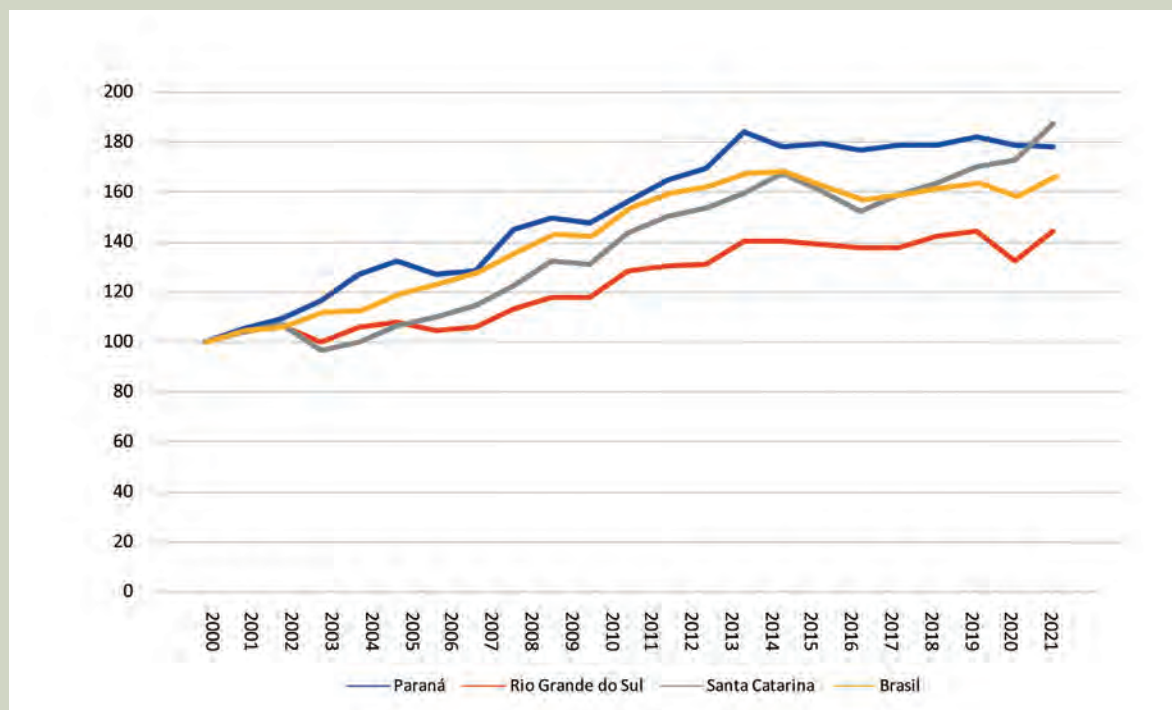
Ao mostrar o índice do PIB com base nas taxas de crescimento anuais, a partir de uma base comum, o Gráfico 1 revela a variação acumulada do PIB de cada estado e do país a partir dessa base comum. Evidencia-se que o RS apresentou menor dinamismo macroeconômico, com um crescimento acumulado entre 2000 e 2001 inferior ao de SC, PR e também em relação ao Brasil como um todo.

A performance revelada no Gráfico 1 reflete-se no Gráfico 2, que mostra tendência de redução da participação do estado no PIB

nacional ao longo do período entre 2000 e 2023: a perda de dinamismo macroeconômico observada no crescimento acumulado traduz-se na diminuição relativa do peso econômico do Rio Grande do Sul no quadro nacional. No início do período indicado, a economia gaúcha representava cerca de 7,5% do total nacional, mas essa proporção foi reduzida gradualmente, situando-se em torno de 6% nos anos mais recentes.

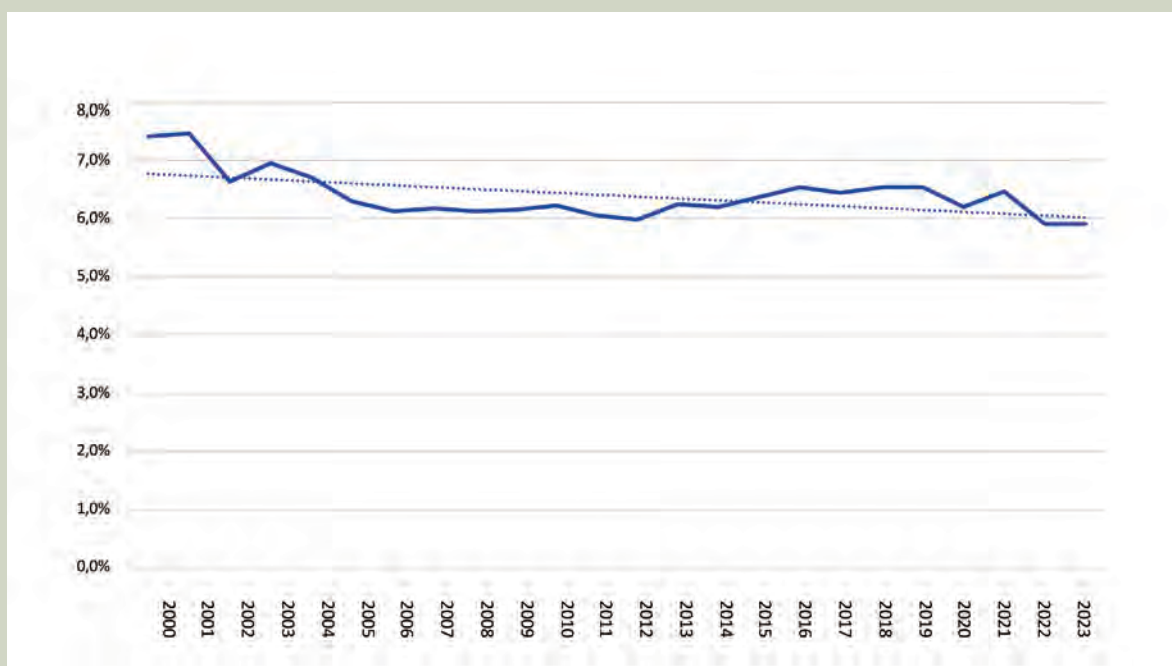
Destaca-se também o fato de que o RS fica para trás exatamente no período em que o Brasil cresce mais vigorosamente (o período entre 2003 e 2011). Por outro ângulo, o RS mostra uma maior resistência durante a fase de baixa performance brasileira, o que pode apontar para a presença de fatores

Gráfico 1. RS, SC, PR e Brasil - Índice do Produto Interno Bruto por estado entre 2000 e 2021 (2000=100)



Fonte dos dados: IBGE – Contas Nacionais e Regionais; elaboração dos autores.

Gráfico 2. Participação do PIB do Rio Grande do Sul no PIB do Brasil entre 2000 e 2023



Fonte dos dados: IBGE – Contas Nacionais e Regionais; elaboração dos autores.

de resiliência econômica (esse ponto será discutido na seção seguinte).

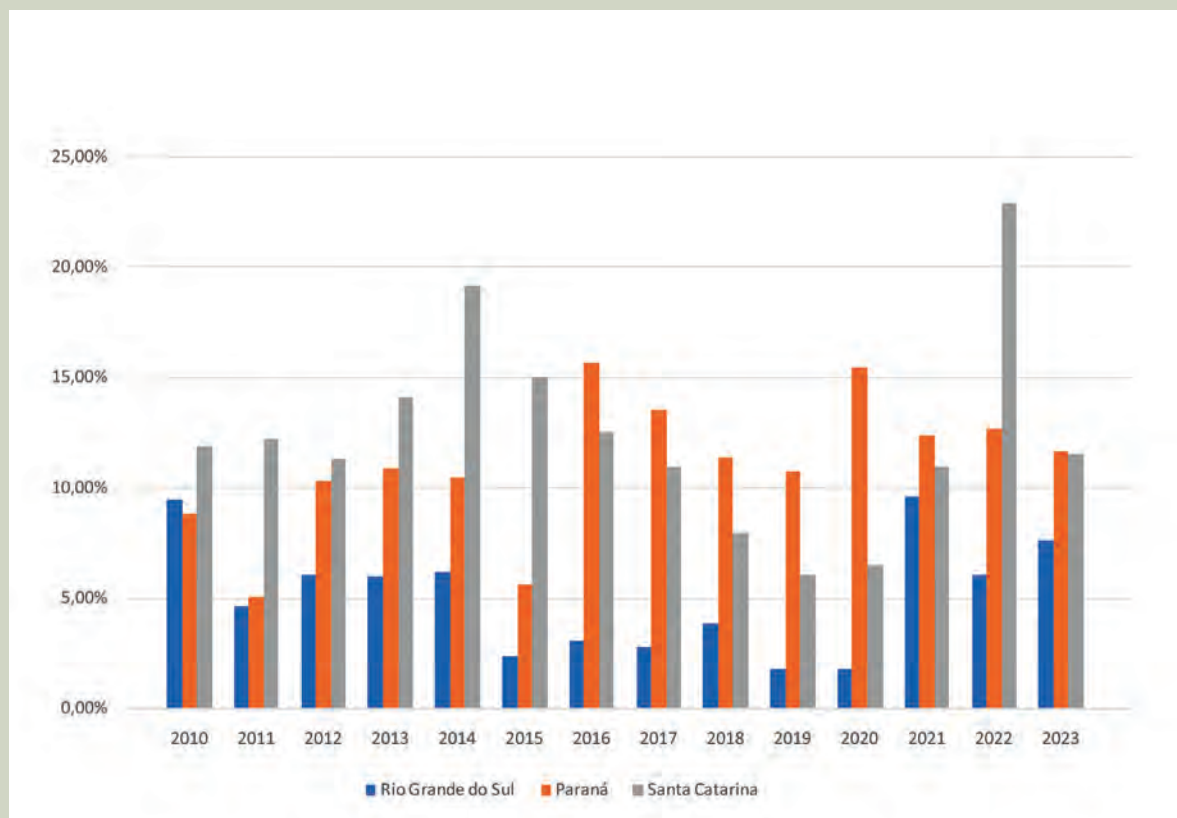
Embora gradual, a linha de tendência mostrada no Gráfico 2 é um alerta para lideranças estaduais. Esse comportamento reflete perda de relevância econômica, sinalizando que o desempenho do RS não acompanhou o crescimento médio das demais unidades federativas do país ao longo das últimas duas décadas.

O Gráfico 3 mostra o investimento público como proporção da despesa pública total nos estados da região Sul. A capacidade de investimento público tem função estratégica ao impulsionar setores produtivos, modernizar a infraestrutura e promover a diversificação

das atividades econômicas. A ausência de investimentos expressivos, por sua vez, reforça os constrangimentos estruturais ao investimento privado e limita o dinamismo econômico.

O Gráfico 3 mostra que, entre 2000 e 2023, o RS apresentou os menores níveis de investimento público como proporção da despesa pública total, entre os estados analisados. Tal proporção manteve-se abaixo de 5% em grande parte do período. Esse comportamento contrasta significativamente com SC, que apresentou picos expressivos, como em 2013, quando os investimentos superaram a marca de 20%, e com o PR, que manteve patamares superiores ao longo de diversos anos. A trajetória de investimento no Rio Grande do

Gráfico 3. Investimento público como percentual do PIB estadual entre 2010 e 2023



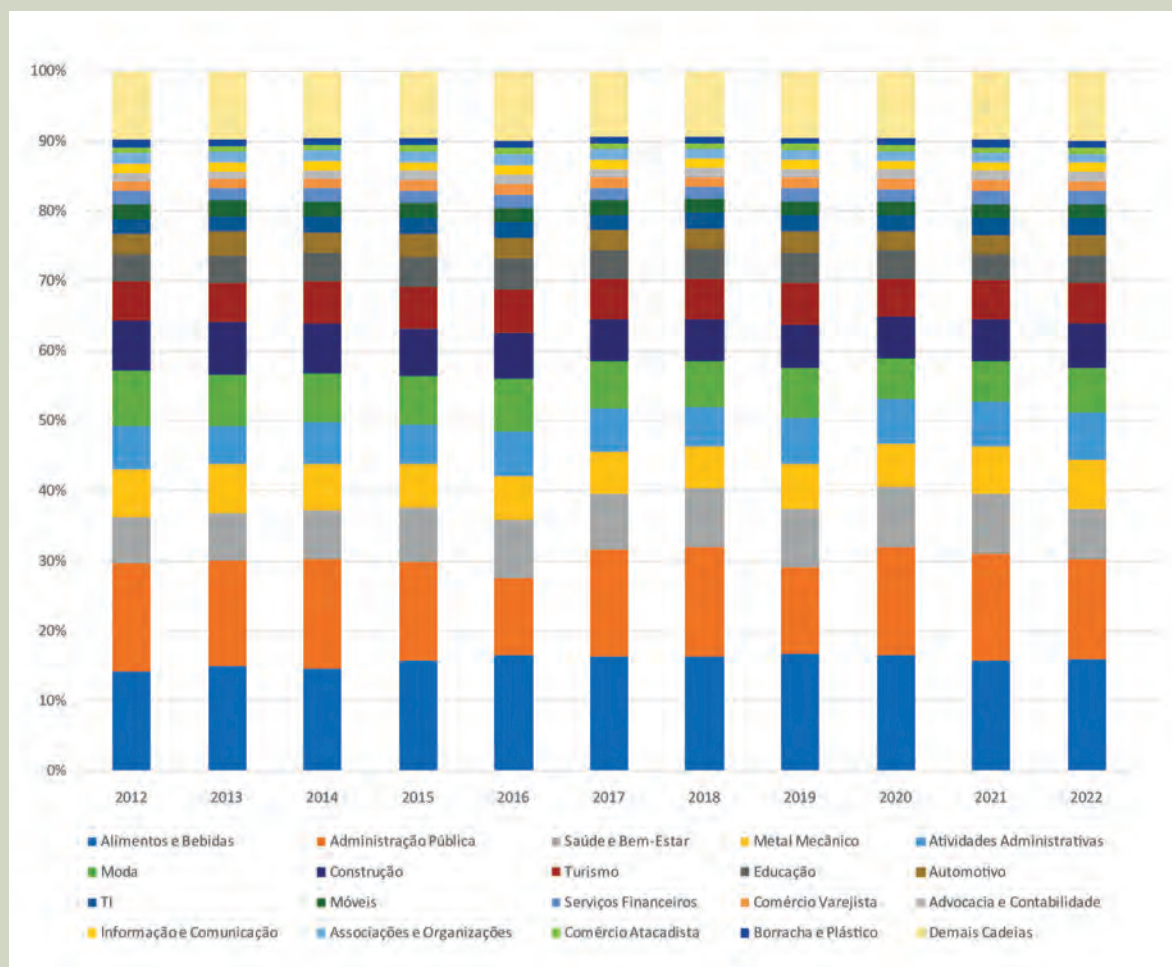
Fonte dos dados: Ipeadata; elaboração dos autores.

Sul revela restrições fiscais persistentes e uma incapacidade estrutural de mobilização de recursos para áreas de impacto econômico significativo¹⁷.

O gráfico 4 destaca os principais segmentos produtivos do RS, utilizando como variável os vínculos de trabalho¹⁸ disponíveis na base de dados Rais. O segmento das indústrias de Alimentos e Bebidas manteve uma participação de destaque, com proporções oscilando entre o máximo de 16,80% e o mínimo de 14,26% em relação ao total estadual, ao longo do período entre 2012 e 2022. As atividades relacionadas

aos segmentos da Saúde e Bem-Estar também estão entre as principais e ficaram com proporção entre 8,49% e 6,56%. O segmento Metal Mecânico ficou entre 6,93% e 5,96%; as Atividades Administrativas ficaram entre 6,73% e 5,49%. O segmento da Moda, que engloba o setor coureiro-calçadista, manteve uma participação entre 7,86% e 5,73%. A Construção ficou entre 7,56% e 5,94%, o Turismo entre 6,16% e 5,52%; Educação entre 4,43% e 3,67%; Automotivo entre 3,49% e 2,66%; Tecnologia da Informação entre 2,64% e 2,13%; Móveis entre 2,24% e 1,86%; Serviços Financeiros entre 1,97% e 1,82%; Comércio Varejista entre 1,58% e 1,25%.

Gráfico 4. Distribuição dos principais segmentos produtivos do RS entre 2022 e 2012 por vínculos



Fonte dos dados: Rais; elaboração dos autores.

A relativa estabilidade das participações setoriais diversas revelada na economia do Rio Grande do Sul, conforme o Gráfico 4, está na base do que será analisado na subseção seguinte, relacionando-se ao tema da diversificação da estrutura produtiva.

Essa breve análise sobre a evolução mais recente da economia gaúcha em conjunto com os dados apresentados na seção de introdução revela, em síntese: baixa taxa de crescimento da economia gaúcha na comparação com a média da região Sul; redução da participação do PIB gaúcho no PIB nacional, tendência de redução da participação do valor da transformação industrial no PIB estadual (seguindo a tendência nacional, neste caso), crescimento da participação das cadeias produtivas agroindustriais e baixa proporção de investimento no total do dispêndio público, em relação aos demais estados da região Sul. Os dados também mostram que não há alterações significativas em termos de participação setorial no quadro de uma estrutura produtiva relativamente diversificada. A análise comparativa da seção seguinte permitirá avaliar mais detidamente o quadro da estrutura produtiva gaúcha no contexto nacional.

3.2. Configuração e tendências da estrutura produtiva gaúcha

Na seção 1 foram apresentados dados sobre a evolução da economia gaúcha a longo prazo, destacando-se a consolidação de estrutura produtiva mais diversificada e com renda *per capita* mais elevada do que a média brasileira. Na seção 2, elencaram-se aspectos problemáticos do desempenho macroeconômico do RS que podem resultar na observada tendência de baixo crescimento. Diante das evidências internacionais analisadas na seção anterior, acerca da

importância da diversificação e sofisticação da estrutura produtiva para o desenvolvimento sustentável, é pertinente fazer uma questão que se relaciona diretamente com o objetivo do artigo, conforme expresso na seção de introdução. Trata-se de indagar se o desempenho macroeconômico do RS já comprometeu os atributos positivos da estrutura produtiva gaúcha mencionados na introdução, ou se a estrutura produtiva do RS ainda pode ser a base para um melhor enfrentamento dos desafios do desenvolvimento sustentável. O objetivo desta subseção é analisar evidências empíricas sobre a posição do RS quanto à composição setorial da estrutura de produção, no contexto da economia brasileira, bem como implicações para o desenvolvimento sustentável, à luz das análises das seções anteriores.

Para captar o perfil de diversificação da economia do RS no conjunto das UFs, em termos de PIB setorial *per capita*, foi realizada uma análise de agrupamento (cluster analysis)¹⁹. Foi utilizada como variável o valor adicionado *per capita* por setor, para cada UF²⁰. A Tabela 1 abaixo mostra os grupos nos quais o RS se encontra para anos selecionados de 2002, 2010 e 2021, para a variável PIB setorial *per capita*, utilizando o método de clustering hierárquico. Em todos os anos e para todas as variáveis, o RS está incluído no grupo das estruturas produtivas mais diversificadas, em relação ao conjunto das UFs brasileiras²¹.

Tabela 1. Grupo integrado pelo RS nos anos selecionados (método de clustering com 4 clusters)

	Ano: 2002	Ano: 2010	Ano: 2021
Variável de escolha para agrupamento	Unidades da UF no grupo do RS	Unidades da UF no grupo do RS	Unidades da UF no grupo do RS
PIB setorial <i>per capita</i>	RS, SC, SP, RJ	RS, SC, PR, RJ, MG, BA, ES, PA, AM	RS, SC, PR, GO, MS, MT, ES, RJ, MG

Fonte: IBGE – Contas Regionais; elaboração dos autores.

A Tabela 2 mostra o conjunto de UFs para as quais são atendidas simultaneamente duas condições: apresentar Valor Adicionado *per capita* acima da média brasileira e apresentar índice de concentração setorial abaixo da média brasileira. Utiliza-se aqui o Índice de Herfindahl-Hirshmann (IHH)²², aplicado às participações no PIB regional nas 14 seções setoriais explicitadas nas Contas Regionais (IBGE). O Gráfico 5 apresenta a dispersão das UFs quanto a essas variáveis, indicando a presença de UFs que se assemelham em termos de renda *per capita* superior e grau de concentração setorial inferior (ou, inversamente, grau de diversificação setorial superior).

Tabela 2. Unidades da Federação agrupadas conforme atendimento de requisitos para todos os anos selecionados (2002, 2010 e 2021)

UFs que atendem simultaneamente os requisitos	
Requisitos: a) IHH igual ou abaixo da média das UFs; b) Valor Adicionado <i>per capita</i> acima da média das UFs;	SP, RJ, RS, SC, PR, MG, MS, ES, GO

Fonte: IBGE; elaboração dos autores.

Com base nessas análises e nos dados disponíveis, pode se afirmar que:

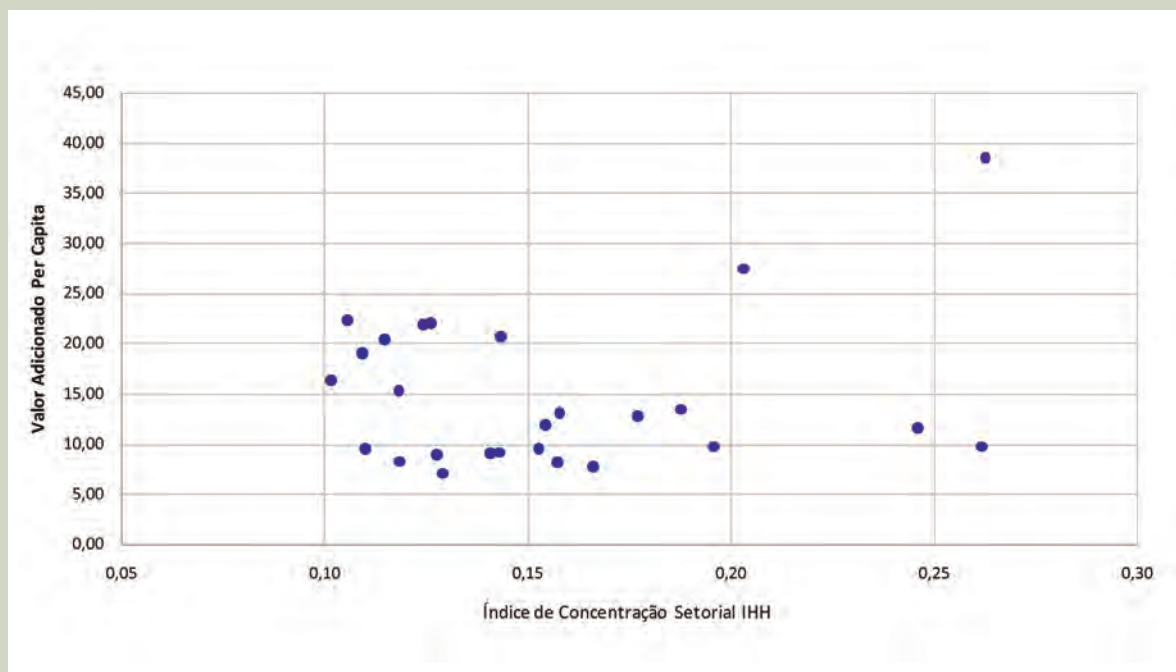
- a) O grau de diversificação do RS tem se mantido superior à média nacional e em níveis equivalentes aos dos demais estados da região Sul (e da Sudeste)²³;
- b) O nível de valor adicionado *per capita* do RS tem se mantido superior à média nacional e entre os mais elevados entre os estados das regiões Sul e Sudeste (e do país, em geral);
- c) O RS apresenta taxa elevada de participação de atividades indicativas de sofisticação da produção, em relação à média nacional, alinhando-se aqui também no grupo das UFs mais desenvolvidas (como exemplo, a proporção do Valor Adicionado

dos grupos de Serviços de Informação e Comunicação – que abriga área de informática – e de Atividades Científicas e Profissionais, em relação ao total)²⁴.

Essa análise é reforçada por evidência de estudo sobre complexidade econômica em comparação interestadual. Salles *et al.* (2022) indicam que o RS figura entre os estados com o melhor índice de prognóstico da complexidade. Segundo os autores, “esses resultados permitem dizer que a atual estrutura econômica desses estados se encontra relativamente próxima de produtos complexos [...]. Para esses estados, o processo de sofisticação seria, portanto, relativamente mais fácil”²⁵. Ainda nessa direção, no ranking de complexidade da plataforma Dataviva, em relação às variáveis emprego e comércio exterior, o RS encontra-se na 3ª e 4ª posição entre as UFs brasileiras, respectivamente.

É possível avaliar positivamente as perspectivas do estado no que se refere ao desenvolvimento sustentável, de acordo com essa análise empírica, e com a literatura e evidências internacionais referentes às correlações entre diversificação, sofisticação produtiva e sustentabilidade. É provável que o estágio da estrutura produtiva do RS apresente tanto elementos da fase do efeito *composição* (em que a mudança estrutural seria na direção de produção menos degradante do ponto de vista ambiental) e de efeito *técnico* (em que se incorporam tecnologias mais limpas, em vários setores da estrutura produtiva)²⁶. Entretanto, é importante avaliar como conciliar essas evidências com os problemas da economia gaúcha destacados na seção 3.1, analisando se tais problemas podem comprometer as virtudes que se destacam no campo da estrutura produtiva. Na seção 4, no contexto das considerações finais e proposições de políticas públicas, esse aparente paradoxo

Gráfico 5. Dispersão das UF's quanto ao Valor Adicionado *per capita* de 2021



Fonte: IBGE; elaboração dos autores.

será analisado, especialmente no que se refere aos objetivos de maior resiliência e sustentabilidade.

4. Considerações finais e implicações para a política pública

Os estudos empíricos analisados neste artigo indicam que as características da estrutura produtiva e a composição setorial da produção são correlacionadas com os objetivos de desenvolvimento econômico sustentável. Mais especificamente, estruturas produtivas que alcançam maior grau de diversificação e sofisticação tendem a apresentar correlação positiva com o nível de renda *per capita* e com a atenuação da degradação ambiental. Conforme a análise, tal relação pode ser explicada por fatores econômicos e tecnológicos: os efeitos *composição (mix) e técnico*, associados ao

processo de mudança da estrutura produtiva na trajetória do desenvolvimento; a elevação de margens de lucro operacional quando a produção se torna mais sofisticada, o que permite mais investimentos em tecnologias *limpas*. Além de se correlacionar com renda *per capita* mais alta, a maior diversificação também implica a diluição de riscos de choques adversos (quer os desastres naturais, quer as crises macroeconômicas). Por outro lado, o aumento da renda *per capita* permite a geração de recursos que podem propiciar uma melhor proteção e capacidade de recuperação diante dos choques adversos. Trata-se, portanto, de aspectos da estrutura produtiva que tendem a gerar efeitos positivos em termos de *prevenção da degradação ambiental, bem como de adaptação e recuperação* diante de choques adversos e mudanças do ambiente.

Ao se examinar o caso do RS, diante do aumento da frequência e intensidade dos

choques adversos climáticos entre 2022 e 2024, tratou-se de analisar as características da sua estrutura produtiva, em termos comparativos no quadro brasileiro e num enfoque de evolução a longo prazo, bem como do desempenho macroeconômico estadual, tendo como referência as relações entre estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável, conforme o marco conceitual-analítico adotado.

A aplicação do método de clustering e a utilização do índice IHH para analisar a evolução e estágio atual da *estrutura produtiva* gaúcha permitiram concluir que o RS ainda se encontra no grupo de estados com maior grau de diversificação produtiva e de valor adicionado *per capita*. Mais do que isso, o RS apresenta-se em boa posição nos rankings de complexidade, e de modo especial no indicador de prognóstico de complexidade econômica²⁷. Por esse prisma, poder-se-ia concluir que o estado pode se beneficiar da sua estrutura produtiva para buscar uma trajetória mais promissora de *desenvolvimento sustentável*, bem como para o enfrentamento dos choques adversos. Nesse sentido, a configuração produtiva (em termos de composição setorial da produção) é um traço estrutural que aparentemente (ainda) não foi alterado, apesar dos problemas de performance da macroeconomia estadual. A análise dos dados indica que essa performance merece uma maior atenção, pois ela pode a médio e longo prazo provocar uma deterioração no quadro da estrutura produtiva, reduzindo seus atributos de diversificação e sofisticação de bens e serviços produzidos.

Ainda que o estado apresente uma configuração estrutural compatível com o grupo dos mais diversificados, a conjunção das trajetórias recentes de baixo crescimento econômico e baixo investimento público formam um quadro de baixo dinamismo

que pode comprometer mais seriamente as perspectivas da economia gaúcha e, por esse motivo, exigem maior atenção das políticas públicas, especialmente no contexto das mudanças climáticas com seus impactos observados em ciclos mais curtos nos anos recentes.

Diante da trajetória econômica e das análises sobre as relações entre estrutura produtiva e desenvolvimento sustentável, cabe refletir sobre alternativas de política de desenvolvimento que permitam alcançar maior *resiliência transformativa*²⁸ à economia do RS, isso é, capacidade de reagir a choques adversos, através de inovações tecnológicas e organizacionais que qualifiquem sua estrutura produtiva, propiciando mais dinamismo econômico, bem-estar social e sustentabilidade, e reduzindo hiatos em relação ao benchmarking internacional.

Em primeiro lugar, *há várias razões para enfrentar o grande desafio de recuperar a capacidade de investimento público como proporção do dispêndio público total no RS*. Mesmo se não houvesse a premência do fator meio ambiente e clima, para alcançar maior crescimento econômico e maior competitividade e atratividade para investimentos privados é necessário atuar em várias frentes de gastos em infraestrutura de transporte, saúde pública, educação, entre outros itens. Os desastres naturais e outros problemas das mudanças climáticas tornam ainda mais imperiosa essa recuperação, porque a infraestrutura é essencial à resiliência operacional diante dos eventos extremos. Trata-se aqui de enfrentar os fatores que levaram a essa situação de fragilização da capacidade de investimento estadual, incluindo as distorções da relação entre despesas correntes e despesas de capital, o problema do endividamento estadual e a preservação das receitas líquidas do estado. Por outro lado, seria

ilusório pensar que outras necessidades no campo socioeconômico e ambiental possam ser alcançadas de forma satisfatória sem resolver o problema do investimento público estadual²⁹.

Em segundo lugar, *destaca-se a necessidade de implementar política de desenvolvimento industrial produtivo para permitir que o RS avance nos estágios de efeito composição/mix e efeito técnico, no processo de transformação estrutural necessário ao desenvolvimento sustentável*, nos termos discutidos nas seções anteriores. Assim como o Brasil está preso à “armadilha da renda média” e perde posição relativa a outros países de industrialização tardia, pode-se dizer que o RS está em uma *encruzilhada*. De um lado, a competitividade e a demanda internacional da produção agropecuária e agroindustrial são forças que levam a um caminho de maior concentração e especialização produtiva. Embora a produção agropecuária no estado tenha sido instada a se adequar a metas de preservação ambiental, uma forte expansão e concentração na atividade primária tende a apresentar o já citado *efeito escala*, com implicações negativas sobre o desenvolvimento sustentável³⁰.

Por outro lado, há recursos potenciais para trilhar outro caminho de espectro mais largo de atividades produtivas, com margens de lucro operacional maiores que permitam investimentos em tecnologias limpas, e substituindo setores tradicionais menos compatíveis com a sustentabilidade. Tais recursos potenciais incluem a própria base produtiva relativamente diversificada já existente e o parque científico-tecnológico existente no estado.

Neste momento pós-enchentes de 2023-2024, cabe aos formuladores da política de desenvolvimento estadual mobilizar mais incisivamente os recursos e alinhá-los ao

esforço recentemente lançado em âmbito federal. A Política Nova Indústria Brasil (NIB) foi lançada como uma resposta aos desafios estruturais enfrentados pela indústria brasileira, com ênfase na modernização tecnológica, diversificação produtiva e sustentabilidade. Uma das principais diretrizes da NIB é o fomento à transição para tecnologias limpas, associando as atividades industriais a compromissos ambientais internacionais, com destaque para as fontes de energia renovável (a denominada *transição energética*). Outro pilar da NIB é a importância atribuída à saúde como vetor de desenvolvimento industrial, incentivando o avanço de complexos empresariais voltados à biotecnologia e saúde, áreas onde o estado do RS já possui instituições de excelência.

A NIB também propõe mecanismos de coordenação federativa, visando alinhar esforços regionais e nacionais em prol da diversificação produtiva. Nesse contexto, destaca-se a possibilidade de aproveitar as mudanças geopolíticas para proteger e estimular a produção local, em um movimento que combina incentivos fiscais, apoio a startups tecnológicas e maior investimento em pesquisa e desenvolvimento.

Em suma, há vários pontos de interseção das potencialidades do RS com as ênfases da política nacional de desenvolvimento industrial: a base das cadeias agroindustriais sustentáveis, a operação vigorosa na área de fontes de energia sustentáveis, a existência de um complexo institucional-empresarial na área do ensino, pesquisa e assistência médica de destaque nacional e internacional, que pode ser alavanca importante para o desenvolvimento do complexo industrial da saúde, a capacitação tecnológica e produtiva de diferentes setores existentes e com potencial para melhoria de produtividade, e setores de serviços integrados

à produção agrícola e pecuária sustentável (turismo rural/colonial, enoturismo, entre outros.) Por outro lado, o avanço das cadeias produtivas de base agropecuária e extrativa responde a sinais vigorosos do mercado internacional e o RS tem aproveitado e se credenciado como um dos grandes produtores e exportadores agroindustriais do país, com alta produtividade e eficiência, e contribuindo para que o Brasil seja o 2º maior exportador mundial de alimentos, demonstrando a capacidade de concretizar vantagens comparativas relativas no setor, e com efeitos benéficos em dimensão microrregional e macroeconômica.

Não se trata de objetivos mutuamente excludentes: buscar posição destacada nas cadeias produtivas agroindustriais é compatível com o desenvolvimento de novos produtos e processos nos setores da indústria, comércio e serviços, em sintonia com os avanços tecnológicos e com a transformação digital em curso. Sem dúvida, há obstáculos importantes e a competição internacional é intensa. Entretanto, neste estágio do século XXI, é necessário estabelecer um caminho para a sustentação e ampliação de estrutura produtiva diversificada, baseada em competências tecnológicas e focada em sustentabilidade. Medidas de proteção da produção local no contexto das mudanças geopolíticas em escala global; o imperativo de tornar a sustentabilidade fator endógeno às escolhas e decisões de investimento e a necessidade de preservar e utilizar o potencial de diversificação e sofisticação produtiva ainda presente no RS: esses são fatores que recomendam fortemente um esforço de proposição e coordenação de política de desenvolvimento produtivo centrado na diversificação e sofisticação do parque produtivo empresarial do RS.

É importante destacar que diversificação produtiva e complexidade não são nem

panaceia, nem um fim em si mesmas, e são atributos de conquista árdua e preservação difícil. Entretanto, nas condições do ambiente sistêmico e das mudanças climáticas, consolidar o grau de diversificação alcançado e fomentar avanços rumo a uma maior sofisticação dos bens e serviços produzidos no RS é *objetivo primordial*. Como base fundamental para esses avanços, é vital a recuperação da capacidade de investimento público, aprimorando de forma substancial a infraestrutura produtiva do estado. As evidências empíricas tratadas neste artigo apontam para a necessidade e viabilidade de perseguir tais objetivos. Mais do que isso, à luz da evolução do tratamento das questões das externalidades ambientais no âmbito das políticas públicas, propõe-se aqui que esses objetivos devam estar orientados pelo enfoque *da coevolução da estrutura produtiva do sistema econômico regional e do ambiente sistêmico* e da construção de resiliência transformativa, tal como apresentado na seção 2, evitando que – na mencionada *encruzilhada* – o RS enverede por uma trilha de especialização e concentração produtiva empobrecedora.

O desenvolvimento da estrutura produtiva é um processo contínuo que envolve investimentos orientados simultaneamente por impulso de crescimento e adequação inovadora à sustentabilidade, contemplando efeitos *composição* e efeitos técnicos indutores de maior sustentabilidade, e que depende da base de competências tecnológicas disponíveis no sistema regional de inovação e sustentabilidade, bem como de coordenação eficiente da política de desenvolvimento. Se bem-sucedida, a mudança da composição setorial poderá promover soluções inovadoras, consolidando-se no estado a *resiliência transformativa*, ampliando a probabilidade de estabelecer trajetórias de desenvolvimento que conciliem

mais satisfatoriamente o bem-estar econômico e a preservação das condições do ecossistema natural. Superar os problemas macroeconômicos estaduais e evitar uma concentração e reespecialização produtiva são condições necessárias para trilhar essa trajetória.

¹ Os dados do PIB nacional e regional têm como fonte os sistemas de contas nacionais e regionais do IBGE, com elaboração dos autores, conforme será explicitado nas seções seguintes do artigo. Os dados do ranking do índice IBID estão no endereço https://www.gov.br/inpi/pt-br/inpi-data/indice-brasil-de-inovacao-e-desenvolvimento-ibid/IBID_2024_PT.BRfinal.pdf.

² Em estudo sobre a composição da indústria de transformação do RS e dos segmentos de mais elevada intensidade tecnológica, Costa (2020) distingue dois grupos de setores, os high-tech e os low-tech: os setores high-tech absorvem cerca de 30% do valor da transformação industrial e 25% do emprego, como proporção do total da indústria de transformação no RS. No que diz respeito às exportações de produtos classificados como high-tech, o estudo indica que elas representaram cerca de 25% do total de exportações industriais no período entre 2007 e 2017.

³ <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>

⁴ Uma característica que se relaciona com o tema da desindustrialização é o aumento da participação das de produtos primários e agroindustriais na pauta de exportações do Rio Grande do Sul. Entre os 10 principais produtos exportados pelo RS entre janeiro e agosto de 2024, sete são produtos primários: soja em grão (US\$ 2,2 bilhões), fumo não manufaturado (US\$ 1,5 bilhão), farelo de soja (US\$ 957,4 milhões), carne de frango (US\$ 807,9 milhões), cereais (US\$ 775,3 milhões), celulose (US\$ 703,7 milhões) e carne suína (US\$ 387,7 milhões) (DEE, 2024).

⁵ Os dados sobre investimento foram obtidos no Ipeadata. Os problemas da economia gaúcha têm sido objeto de estudo em várias perspectivas, incluindo a dinâmica cíclica macroeconômica estadual, as finanças públicas e desempenho setorial. Ver, por exemplo, Conceição (2010) e Barbosa (2024).

⁶ Esses estudos serão analisados na seção 2.

⁷ Neste artigo, adota-se o conceito de choques adversos para o conjunto de perturbações e crises de caráter ambiental, econômico e financeiro que podem afetar uma região. Eventos climáticos extremos, neste sentido, são um tipo de choque adverso, sendo utilizados aqui no contexto da ampliação e maior frequência de fenômenos climáticos que têm tido impacto sobre diversos aspectos da vida econômica e social de uma região.

⁸ Cadot, Carrère, and Strauss-Kahn (2011) ampliam o escopo temporal da análise e reforçam a proposição da curva de U. A curva em U significa que – à medida que o país se desenvolve – o grau de concentração da produção em pouco setores diminui, aumentando a diversificação, até que se atinja um nível de renda per capita a partir do qual o grau de diversificação deixa de aumentar e começa a diminuir. Como será visto adiante, estudos empíricos recentes revelam que esta reconcentração (também chamada de reespecialização) ocorre somente para países intensivos em recursos naturais, não ocorrendo para os demais países. Nestes outros, a curva então seria num formato em L: à medida em que o nível de renda se eleva, a concentração diminui

(a diversificação aumenta) e depois se estabiliza.

⁹ A explicação econômica nesse caso seria a seguinte: ganhos de produtividade derivados da maior integração das empresas propiciam condições competitivas quando há variedade maior de setores produtivos (Bahar et al., 2024).

¹⁰ Curva de Kuznets Ambiental (CKA), nome atribuído a uma variante da relação entre crescimento econômico e desigualdade, proposta pelo economista Simon Kuznets. A curva de Kuznets "original" foi analisada em meados do século XX.

¹¹ Outros estudos e relatórios desse período ampliaram essa visão otimista e pró-crescimento, destacando-se um relatório do Banco Mundial de 1992 (IBRD, 1992), Beckerman (1992) e Lomborg (2001).

¹² Stern (2017) e Guo e Shabazz (2024) fazem um survey dos estudos empíricos realizados ao longo das últimas décadas, bem como uma avaliação sobre aspectos teóricos e metodológicos acerca da abordagem da CKA. Em alguns estudos, há evidências que apontam para um formato em N, indicando que há dois pontos de inflexão no que se refere à degradação ambiental: um na passagem da renda baixa para a renda média e outro no topo de renda quando prossegue o avanço da renda alta.

¹³ Um aspecto importante que passou a se considerar é a relação entre o nível de emissão de poluentes correspondentes aos pontos de inflexão nas curvas CKA e os limiares de degradação ambiental sob a perspectiva da sobrevivência dos ecossistemas, isto é, pontos de irreversibilidade.

¹⁴ Ver Hidalgo et al. (2007) e Hidalgo e Hausman (2009). A operacionalização através de medições aplicadas às exportações e produção e a criação de índices de Complexidade Econômica (índices ECI) propiciou uma gama variada de estudos sobre os efeitos do desenvolvimento econômico e da heterogeneidade da estrutura produtiva sobre diferentes variáveis (desigualdade de renda, degradação ambiental, emissão de dióxido de carbono, entre outros). Ver também Can e Gozgor (2017), Romero e Gramkow (2021) e Zhen e Freire (2023).

¹⁵ O conceito de externalidade em economia refere-se aos efeitos das ações de agentes econômicos sobre o bem-estar de outros agentes econômicos não envolvidos em tais ações. Há vários tipos de externalidades, negativas ou positivas. Um tipo de externalidade que se destaca pela frequência e amplitude são os efeitos ambientais negativos provocados por variados processos de produção de bens e serviços, os quais atingem comunidades vizinhas, cidades, rios, e às vezes regiões mais amplas, como é o caso da poluição dos oceanos e dos efeitos sobre a atmosfera.

¹⁶ Todos os dados apresentados nesta seção foram extraídos do Ipeadata, a partir de informações fornecidas pelo IBGE.

¹⁷ Além da pressão das despesas de custeio, a dívida pública com a União também tem sido um fator importante para a restrição dos investimentos públicos no RS: dos R\$ 104 bilhões de dívida pública em 2023 – equivalente a 185% da receita corrente líquida (RCL) –, a dívida do estado com a União alcançou R\$ 92,8 bilhões. O pagamento consome mais de 10% do orçamento estadual, limitando investimentos em áreas prioritárias.

¹⁸ São consideradas como vínculos as relações de trabalho dos celetistas, dos estatutários, dos trabalhadores regidos por contratos temporários, por prazo determinado, e dos empregados avulsos, quando contratados por sindicatos. Trata-se de um indicador importante da atividade econômica, que permite avaliar o peso relativo das atividades setoriais.

¹⁹ A análise de agrupamento é uma metodologia de construção de representações de objetos baseadas nas suas similaridades. O objetivo é tratar da heterogeneidade dos dados, formando agrupamentos com base em medidas de distância, dissimilaridade ou

densidade. (Ver Lattin et al., 2011). No presente estudo, o objetivo é identificar grupos de UFs quanto a variáveis que expressem características estruturais, de modo a permitir identificar em qual agrupamento o RS em geral é incluído e como evolui esse perfil de agrupamento ao longo do tempo.

²⁰ A base de dados das Contas Regionais do IBGE apresenta os dados setoriais de valor adicionado a preços básicos, a preços constantes de 2010. Nos anexos, estão descritos os procedimentos metodológicos.

²¹ Quanto ao Paraná, o crescimento acentuado do PIB e da produção industrial entre 2002 e 2010 explica o ingresso nesse cluster. Por outro lado, a ausência de São Paulo pode ser explicada pelo forte e diferenciado aumento da participação do setor financeiro. É importante observar que para alguns atributos mais agregados, como renda per capita e índice de concentração, São Paulo fica agrupado nas vizinhanças dos demais estados da região Sul e Sudeste, como será visto na Tabela 2 e no Gráfico 5.

²² Em contraste com os índices relativos de especialização (ou o oposto da diversificação) tal como o índice de Krugman, o IHH é um índice absoluto de concentração, que varia entre $1/n$ (máxima dispersão ou diversificação) e 1 (máxima concentração ou especialização), onde n é o número de setores computados.

²³ Essas são as regiões brasileiras que mais evoluíram no sentido de diversificação produtiva, especialmente no período da industrialização associada ao processo de substituição de importações, ao longo do século XX. Deve-se observar que a medição do grau de diversificação relativa poderia ser ainda maior se houvesse disponibilidade de dados mais desagregados no grupo da indústria de transformação, o qual reúne uma gama muito variada de segmentos setoriais que estão presentes de forma mais elevada nas regiões Sul e Sudeste.

²⁴ Tais dados constam da base estatística utilizada para a análise de clustering e estão disponíveis na base de dados de contas regionais do IBGE.

²⁵ Salles et al. (2022), p. 51.

²⁶ Ver a subseção 2.1.

²⁷ Utilizando um termo gauchesco, pode-se dizer que o RS não se “desgarrou” do grupo de estados brasileiros com maior grau de valor adicionado setorial e com estrutura produtiva relativamente mais diversificada e sofisticada.

²⁸ Conforme definição proposta na seção 2 deste artigo.

²⁹ De modo mais amplo, os desafios dos eventos climáticos extremos e do desenvolvimento sustentável exigem uma ênfase maior na capacidade de planejamento do estado (Ver Henkin e Schonewald, 2024).

³⁰ Nos termos técnicos já analisados, o efeito levaria ao formato em N da curva de Kuznets ambiental.

Referências

- ANDREONI, J.; LEVINSON, A. M. *The simple analytics of the environmental kuznets curve*. SSRN, 1998. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=132949>. Acesso em: 2 jan. 2025.
- BAHAR, D. *Diversification or specialization: what is the path to growth and development*. Washington, DC: Brookings, 2016.
- BAHAR, D.; BUSTOS, S.; YILDIRIM, M. A. *Stages of diversification revisited*. Background paper prepared for World Development Report 2024. Washington, DC: World Bank, 2024.
- BARBOSA, F. F. *Estrutura produtiva e indicadores da produção industrial no Rio Grande do Sul de 2002 a 2022*. Porto Alegre: DEE/RS, 2024. (Nota técnica n. 96).
- BECKERMAN, W. Economic growth and the environment: whose growth? Whose environment? *World Development*, v. 20, 1992, p. 481-496.
- CADOT, O.; CARRERE, C.; STRAUSS-KAHN, V. *Trade diversification, income, and growth: what do we know?* Ferdi, 2011. (Working Papers, P33).
- CAN, M.; GOZGOR, G. The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, 2017, p. 16364-16370.
- CONCEIÇÃO, O. et al. (Org.). *O movimento da produção*. Porto Alegre: Fee, 2010. (Três Décadas de Economia Gaúcha, v. 2).
- DEE – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO DO RIO GRANDE DO SUL. Estatísticas das exportações do Rio Grande do Sul: janeiro a agosto de 2024. Porto Alegre: DEE, 2024. (Nota técnica, n. 99). Disponível em: <https://admin.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202409/nt-dee-99-estatisticas-das-exportacoes-do-rio-grande-do-sul-janeiro-a-agosto-de-2024.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. *Environmental impacts of a North American free trade agreement*. Cambridge, MA: Nber, 1991. (Working Paper 3914).
- GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, v. 110, n. 2, 1995, p. 353-377.
- GUO, X.; SHAHBAZ, M. The existence of environmental kuznets curve: critical look and future implications for environmental management. *Journal of Environmental Management*, v. 35, 2024, p. 1196-48.
- HARBAUGH, W.; LEVINSON, A.; WILSON, D. M. Reexamining the empirical evidence for an environmental kuznets curve. *Review of Economics and Statistics*, 2002.
- HENKIN, H. E SCHONERWALD, C.E. Dinâmica da reconstrução pós-catástrofes climáticas no Rio Grande do Sul: reflexões sobre governança, iniciativas estratégicas e alocação de recursos. *Boletim Finde*. v. 5, n. 2, maio-ago. 2024.
- HIDALGO, C. A.; HAUSMANN, R. The building of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, v. 106, n. 26, 2009, p. 10570-10575.
- HIDALGO, C. A. et al. The product space conditions the development of nations. *Science*, v. 317, n. 5837, 2007, p. 482-487.

- IMBS, J.; WACZIARG, R. Stages of diversification. *The American Economic Review*, 2003.
- LATTIN, J. M.; CARROL, J. D.; GREEN, P. E. Análise de dados multivariados. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- LOMBORG, B. The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- MARTIN, R.; SUNLEY, P. On the notion of regional economic resilience: conceptualisation and explanation. *Journal of Economic Geography*. Cambridge: University of Cambridge; Southampton: Southampton University, 2014.
- MARTINI, B. Resilience and economic structure: are they related? *Structural Change and Economic Dynamics*, v. 54, 2020, p. 62-91.
- ROMERO, J. P.; GRAMKOW, C. Economic complexity and greenhouse gas emissions. *World Development*, v. 139, 2021, p. 105317.
- SALLES, F. C. et al. A armadilha da baixa complexidade em Minas Gerais: o desafio da sofisticação econômica em um estado exportador de commodities. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 17, 2022, p. 33-62.
- SIMMIE, J.; MARTIN, R. The economic resilience of regions: towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, v. 3, n. 1, 2010, p. 27-43.
- STERN, D. I. The environmental kuznets curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, v. 19, 2017, p. 7-28. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10818-017-9243-1>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- STERN, D. I. The rise and fall of the environmental kuznets Curve. *World Development*, v. 32, 2004, p. 1419-1439.
- STERN, D. I.; COMMON, M. S. Is there an environmental kuznets curve for sulfur? *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 41, 2001, p. 162-178.
- ZHEN, N.; FREIRE, C. The interlinks between the economic complexity and carbon footprint. (Background Paper). United Nations Conference on Trade and Development. Geneva: Unctad, 2023.

Equipe de trabalho

Hélio Henkin
Doutor em Economia
Professor da FCE/UFRGS e do Departamento de Economia e Relações Internacionais DERI/UFRGS

Carlos Schönerwald
Doutor em Economia
Professor do Departamento de Economia e Relações Internacionais DERI/UFRGS

Luiza Pecis Valenti
Doutora em Economia
Pós-Doutoranda DERI/UFRGS

Lisiane de Souza Nunes de Moura
Graduada em Estatística
Estatística no Departamento de Gestão Integrada DGI/UFRGS





Estratégias para mitigação das mudanças climáticas no bioma Pampa

RAFAEL CABRAL CRUZ
IGOR POLETTO
ANDRÉ CARLOS CRUZ COPETTI
BEATRIZ STOLL MORAES
LUCIANA BORBA BENETTI
WELLINGTON BITTENCOURT DOS SANTOS





RESUMO

No Brasil, o bioma Pampa está restrito ao estado do Rio Grande do Sul. Nos quatro anos anteriores aos eventos catastróficos de 2024, em três deles, a maior parte do território do Pampa apresentou situações de emergência em função das estiagens. Os dados de monitoramento global mostram que as emissões de gases do efeito estufa estão ocorrendo segundo os cenários de alta emissão, o que significa aquecimento forte da atmosfera, incluindo alterações no ciclo hidrológico. No Pampa, o estudo mostra que o aumento da precipitação previsto não vai compensar as perdas por evapotranspiração, resultando em aumento do número de meses com déficit hídrico. O quadro modelado remete para uma situação que exige uma série de mudanças na forma como a sociedade se relaciona com o seu ambiente, o que levou à proposição de uma série de ideias para subsidiar a construção de políticas públicas de enfrentamento das mudanças climáticas no Pampa.



Fábio Pozzebom/Agência Brasil

Rio com baixo volume de água em período de estiagem.

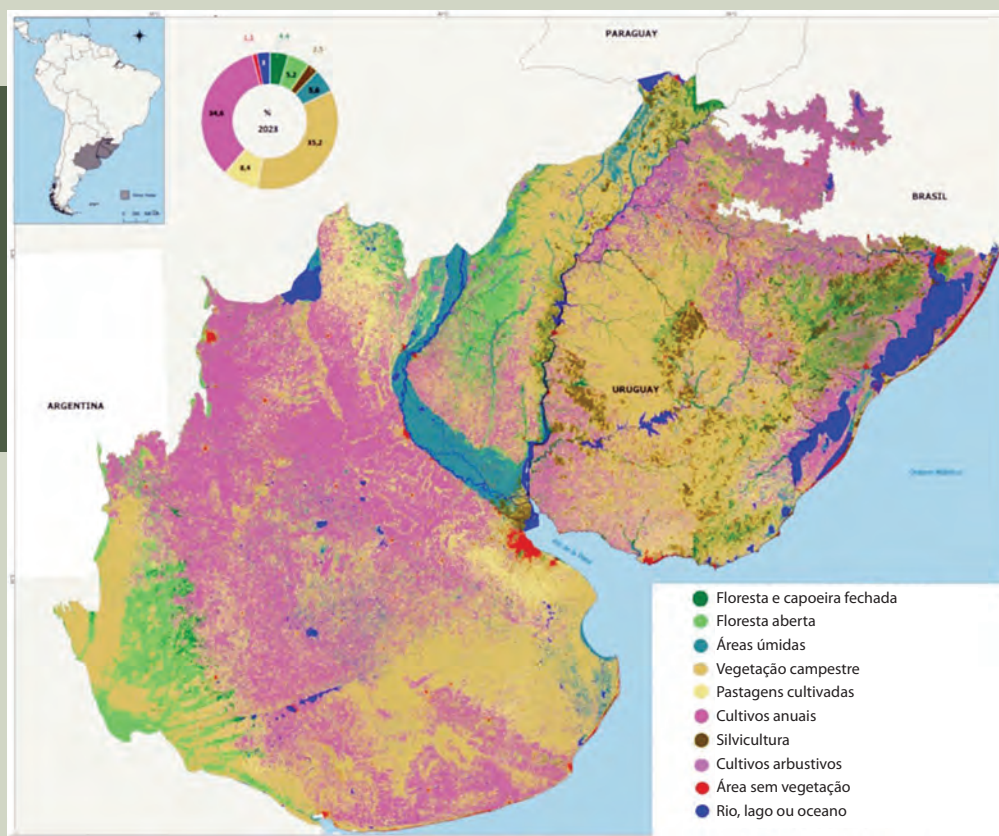
O colapso ambiental e climático do bioma Pampa

O bioma Pampa possui cerca de 70 milhões de hectares e é a maior região temperada com cobertura campestre da América do Sul, com ocorrência na Argentina, Uruguai e Brasil (Baeza *et al.* 2022). De acordo com o projeto MapBiomas Pampa (MapBiomas, 2024a), o bioma cobre 83,8 milhões de hectares, ou 6,1% da América do Sul. De acordo com Baeza *et al.* (op.cit.), o bioma perdeu, entre 2001 e 2018, 2,4 milhões de hectares de vegetação

campestre, cerca de 9% da área existente em 2001, sendo a perda concentrada no Uruguai e Brasil, devido à ampliação das áreas agrícolas e silvicultura, que avançaram, respectivamente, 5% e 100% em relação a 2001. A Figura 1 apresenta a distribuição do bioma na América do Sul e sua cobertura vegetal em 2022.

No Brasil, o Pampa está restrito a parte do estado do Rio Grande do Sul. Situado em região com grande diversidade geológica, em uma zona de transição entre os climas tropical e temperado, apresenta uma diversidade de ecossistemas que resultam de processos de

Figura 1.
Cobertura
da terra no
bioma Pampa,
Argentina,
Uruguai e
Brasil, 2023.



Fonte: Coleção 4, MapBiomias Pampa (MapBiomias, 2024a).

coevolução de seres humanos, vegetação e fauna, cerca de 13.500 anos atrás. Essa região de fronteira climática torna o bioma muito sensível às mudanças climáticas ao longo desse período.

Cruz e Guadagnin (2010) propuseram uma síntese da história ambiental do Pampa em quatro ciclos de transformações: 1) A chegada do ser humano (cerca de 13.500 anos); 2) A chegada dos europeus em 1638; 3) A introdução da agricultura industrial após a Segunda Guerra Mundial e 4) As mudanças climáticas induzidas pela atividade humana.

Os autores propõem que em cada um desses ciclos, ocorreram perturbações que levaram à coevolução entre os seres humanos e a vegetação pampiana (primeiro e segundo ciclos), predominantemente campestre; pelos

pecuaristas familiares através da caça do gado assilvestrado até a criação extensiva nas estâncias, utilizando uma sucessão de combinações como o uso do fogo, do pastoreio e pisoteio, que levaram a processos adaptativos que resultaram em uma vegetação de alta biodiversidade. Já o terceiro e quarto ciclos levaram à perda de estabilidade e troca dos ecossistemas campestres adaptados por agroecossistemas, com impactos nos serviços ambientais e na biodiversidade. Essas mudanças contribuem para a perda de ativos socioambientais necessários para o enfrentamento às mudanças climáticas, resultando em desterritorialização das populações tradicionais, ao mesmo tempo em que ocorre uma territorialização do empresariado rural. "A base objetiva sobre a qual se construiu a coevolução do gaúcho e do Pampa se rompe

com a substituição da estância pela granja" (Cruz; Guadagnin, 2010, p. 10). Pode-se acrescentar, além da estância, a grande quantidade de propriedades de pecuaristas familiares e de quilombolas que se constituem nos últimos redutos de resistência cultural. No Pampa brasileiro, observa-se que a maior parte dos remanescentes de vegetação pampiana nativa situam-se na Serra do Sudeste e Planalto da Região da Campanha, em áreas com restrições do solo e do relevo à mecanização agrícola.

As mudanças fizeram parte da história ambiental do Pampa. Nos dois primeiros ciclos, o tempo disponível para as mudanças foi de milhares de anos e de centenas de anos, respectivamente. Já nos terceiro e quarto ciclos, a escala temporal caiu para décadas, o que torna mais difíceis os processos de dispersão e adaptação da biota, resultando em alto grau de fragilidade dos ecossistemas. No entanto, ao longo de todo esse período, os seres vivos foram acumulando memórias genéticas e bioquímicas, de modo que existem potenciais adaptativos para climas diferentes ao que vivenciamos hoje.

Existe na biodiversidade pampiana um reservatório de espécies que podem contribuir para a manutenção dos serviços ambientais e manutenção da estabilidade dos ecossistemas perante um clima que tende a um aumento sensível do déficit hídrico, resultantes das mudanças climáticas. Por exemplo, a vegetação do Parque Estadual do Espinilho, no extremo oeste do bioma no Brasil, apresenta presença de espécies adaptadas ao Semiárido. Porém, esse acervo da biodiversidade está sob uma velocidade muito grande de perda em função da mudança no uso da terra, em especial com o avanço de commodities como a soja e a silvicultura.

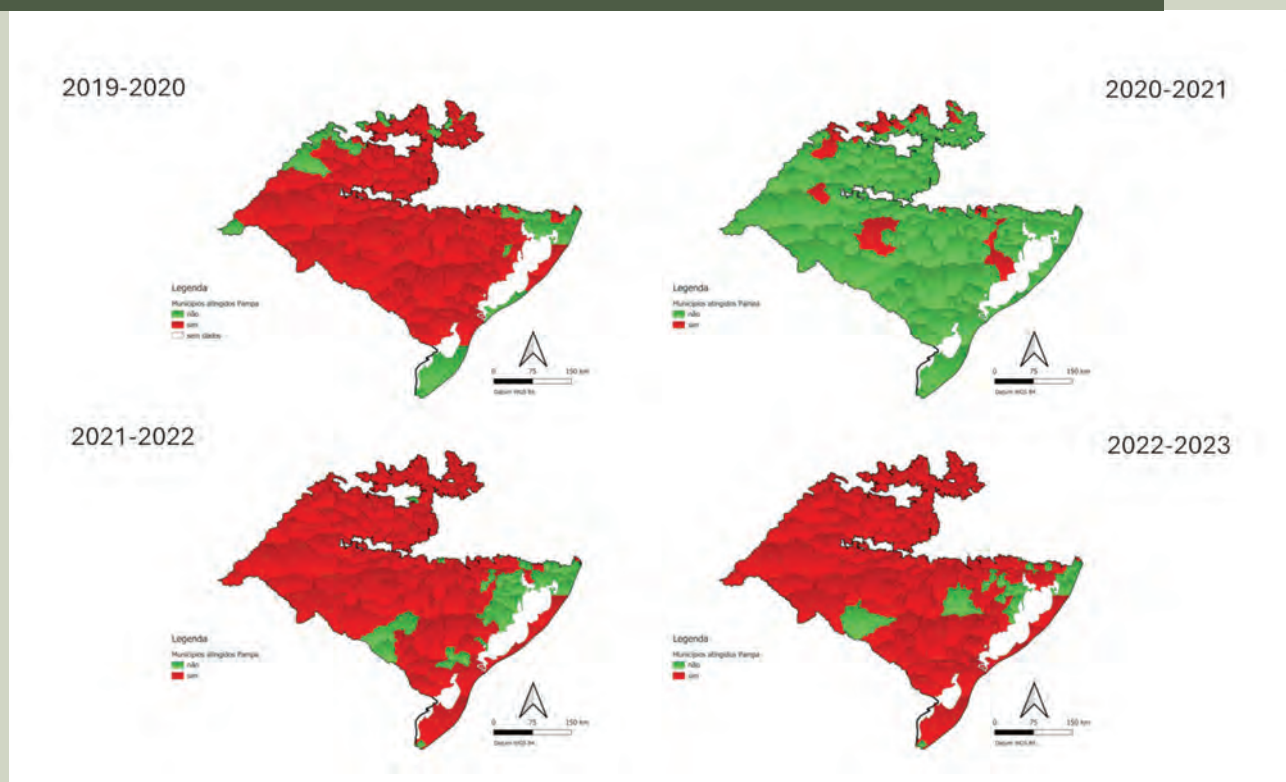
Segundo Vélez *et al.* (2024), a vegetação campestre ocupa 32%, enquanto as florestas

representam 12% do Pampa brasileiro. A perda de vegetação campestre entre 1985 e 2022 foi de 32%, o que representa uma perda média de 146.400 hectares/ano. Conjuntamente com essa mudança no uso da terra, as mudanças climáticas têm causado, em especial nos últimos cinco anos, impactos socioambientais significativos. As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, a distribuição dos municípios atingidos pelas estiagens nos anos agrícolas de 2019-2020 a 2022-2023 e a distribuição dos atingidos pelos eventos extremos de inundações e enchentes no evento de abril/junho de 2024 no bioma Pampa. Nos quatro anos anteriores aos eventos catastróficos de 2024, em três deles, a maior parte do território do Pampa apresentou situação de emergência em função das estiagens, 185 municípios atingidos em 2019-2020, 51 em 2020-2021, 189 em 2021-2022 e 205 em 2022-2023. Já em 2024, em função das cheias, 226 municípios, dos 233 do Pampa, foram atingidos pelos impactos dos eventos extremos. Se considerarmos todos os anos e estiagens e cheias em conjunto, todos os municípios do Pampa foram atingidos nesses cinco anos. De acordo com Fonseca *et al.* (2024), dos 34 municípios do Rio Grande do Sul que tiveram mais de 20% da área atingida, 27 estão no Pampa.

Segundo MapBiomas (2024b), a área total atingida no Pampa nos eventos de 2024 foi de 1.283.352 ha. Desses, 8.842 ha em áreas urbanizadas, 860.773 ha de áreas de cultivos agrícolas, 304.405 ha de formações campestres e 143.934 ha de florestas atingidas. Estudos anteriores¹ realçam os efeitos sinérgicos da mudança da cobertura da terra e da mudança climática sobre o Pampa, em especial sobre o déficit hídrico e seus impactos socioambientais.

Os modelos climáticos do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, MCTI, 2021) buscam subsidiar negociações em escala

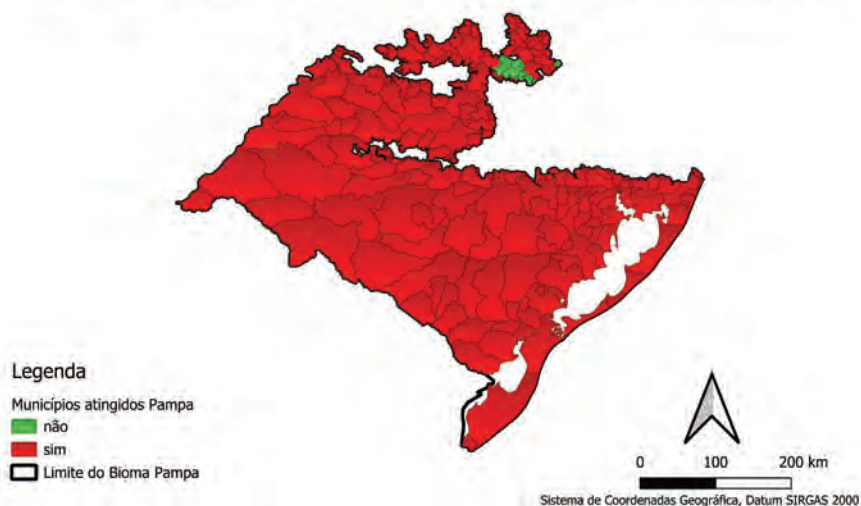
Figura 2. Municípios com decretos de situação de emergência ou de estado de calamidade pública por estiagens no bioma Pampa nos anos agrícolas de 2019-2020 a 2022-2023.



Fonte: adaptado de Defesa Civil RS (2023).

Figura 3.
Municípios com decretos de situação de emergência ou de estado de calamidade pública pelos eventos extremos de inundações e enchentes no bioma Pampa no período abril-junho de 2024.

Municípios atingidos pelos eventos climáticos etremos de abril/maio de 2024, Bioma Pampa no Rio Grande do Sul
Dados válidos para 14/05/2024
Fonte: <https://www.defesacivil.rs.gov.br/defesa-civil-actualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-14-5-9h>



Fonte: adaptado de Defesa Civil RS (2024).

global para o enfrentamento das mudanças climáticas. Em escalas nacionais e regionais, os países devem efetuar o downscaling (adequação dos modelos para escalas de maior detalhe) para que as políticas públicas nacionais e regionais possam ser assessoradas adequadamente. No Brasil, esse processo é efetuado pelo Inpe/CPTEC (2024), que disponibiliza os resultados dos modelos regionalizados.

Os modelos utilizados pelo IPCC estimam simulações do sistema climático que incluem componentes da atmosfera, do oceano, do gelo marinho e da terra (Tebaldi *et al.*, 2021), além de, em alguns casos, outros aspectos do sistema terrestre, como química e biologia. O IPCC utiliza cenários expressos por diferentes trajetórias socioeconômicas compartilhadas (SSPs) que são utilizadas para avaliar as emissões futuras, a mudança climática, seus riscos e impactos e estratégias de adaptação e mitigação. Os SSPs utilizados no AR6² (IPCC, 2023) incluem cenários de alta e altíssima emissão de gases do efeito estufa (SSP3-7.0 e SSP5-8.5), emissões intermediárias (SSP2-4.5), baixas (SSP1-2.6) e muito baixas (SSP1-1.9).

Esses modelos globais possuem resoluções espaciais inadequadas para estudos regionais e locais. Para resolver este problema, instituições nacionais, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), desenvolvem modelos baseados nos cenários globais para melhorar a resolução espacial para aplicações nacionais e regionais. Uma das limitações para o enfrentamento da urgência do planejamento de ações de adaptação e mitigação das mudanças climáticas no Pampa é que os modelos regionalizados disponíveis demoram a ser disponibilizados na escala adequada. No Brasil, os modelos regionalizados disponíveis ainda refletem os modelos globais relativos ao AR4 (ocorrido em 2007). Modelos do AR6 (ocorrido em 2019) disponíveis, como em World Bank

(2024), permitem consultas somente para a média do estado do Rio Grande do Sul. Perde-se, desta forma, a possibilidade de se cruzar a heterogeneidade espacial de informações relacionadas à geo, bio e antropodiversidade com a diversidade climática pampiana, segundo as projeções mais recentes.

De acordo com IPCC (2023), em cenários globais, continuamos a viver um cenário de alta emissão de GEE, como já verificado por Fuss *et al.* (2014). Na Figura 4 pode-se observar os resultados, com a sobreposição da linha preta (dados medidos) com a linha vermelha (média das previsões dos cenários de alta emissão), que demonstra que vivemos, de fato, condições que mostram que o cenário que efetivamente está ocorrendo é o de alta emissão. Ainda, segundo o IPCC (2023), as emissões devem aumentar, levando a temperatura global para um aumento de 2,2 para 3,5°C por volta de 2100. Portanto, para fins de estabelecimento de cenário de referência para efeito de estabelecimento de políticas públicas, o princípio da precaução (MMA, 2024) ressalta a necessidade de se trabalhar com cenários de alta emissão.

De acordo com o AR6 (IPCC, 2023), a previsão de aumento da temperatura seria de 1,5°C na primeira metade da década de 2030. O aquecimento está acelerando, tendo aumentado mais desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos nos últimos 2.000 anos (IPCC, 2023, p. 4), a velocidade do aquecimento aumentou drasticamente no período de 1850-2020, ultrapassando o período mais quente anterior em 100.000 anos. Carlos Nobre realçou que o IPCC havia estabelecido o limite do aquecimento global para um aumento de 1,5°C sob a média do período pré-industrial. “No entanto, ele apontou que já atingimos essa temperatura, com alguns meses registrando picos de até 1,6°C. “A previsão era de que esse valor fosse alcançado permanentemente por

volta de 2033 a 2035, mas estamos muito mais próximos disso do que imaginávamos" (Planeta Campo, 2024).

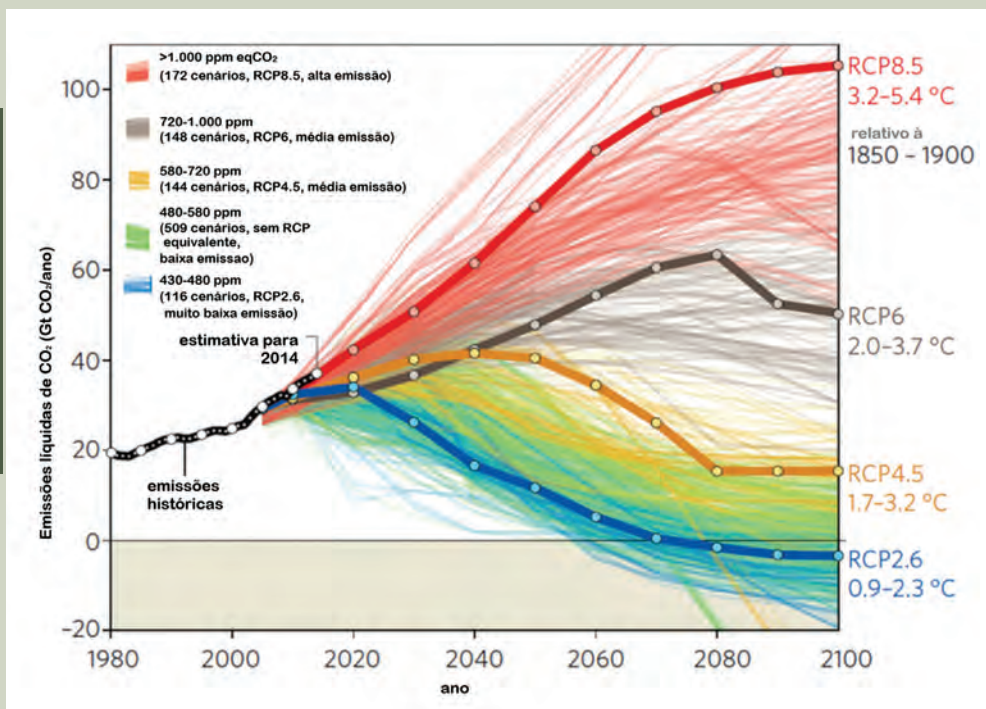
No Brasil, utilizando modelos regionalizados, os cientistas já alertavam para os impactos socioambientais das mudanças climáticas, como relata Nobre em 2001 que, em função da emissão de GEE, no Rio Grande do Sul, deveria aumentar a evaporação, o que alteraria o balanço hídrico e a disponibilidade de água no solo. O autor ressalta a "enorme carência de estudos sobre a vulnerabilidade da sociedade, da economia e do ambiente, incluindo os ecossistemas, às mudanças climáticas globais" (Nobre, 2001, p. 256). Quanto à agricultura, Nobre (2001) sugeriu a incorporação da mudança climática no zoneamento agrícola, nas práticas agrícolas, na extensão e educação, ressaltando prioridade para a mudança nas pequenas e médias propriedades, que teriam potencial de responder mais rápido às ações de adaptação.

Para onde vai(vão) o(s) Pampa(s)?

Para se ter um quadro dos impactos mais importantes das mudanças climáticas sobre o Pampa, fazem-se necessárias algumas considerações. Somente estão disponíveis dados dos modelos globais que estão disponibilizados como valores médios para o estado do Rio Grande do Sul. Assim, considerou-se que os dados médios do Rio Grande do Sul são representativos da média do bioma.

O primeiro impacto das mudanças climáticas, com base nos cenários do AR6 (World Bank, 2024) pode ser visualizado na Figura 5, que apresenta a diferença entre evapotranspiração potencial (ETP) e precipitação (P) para o período de referência (1995-2014) e as décadas de 2040, 2060, 2080 e 2090. Essa informação é a primeira abordagem para o balanço hídrico: quando a ETP é maior que a P, toda a água da

Figura 4.
Comparação da
média global
de emissão de
gases do efeito
estufa com os
cenários do
AR5.



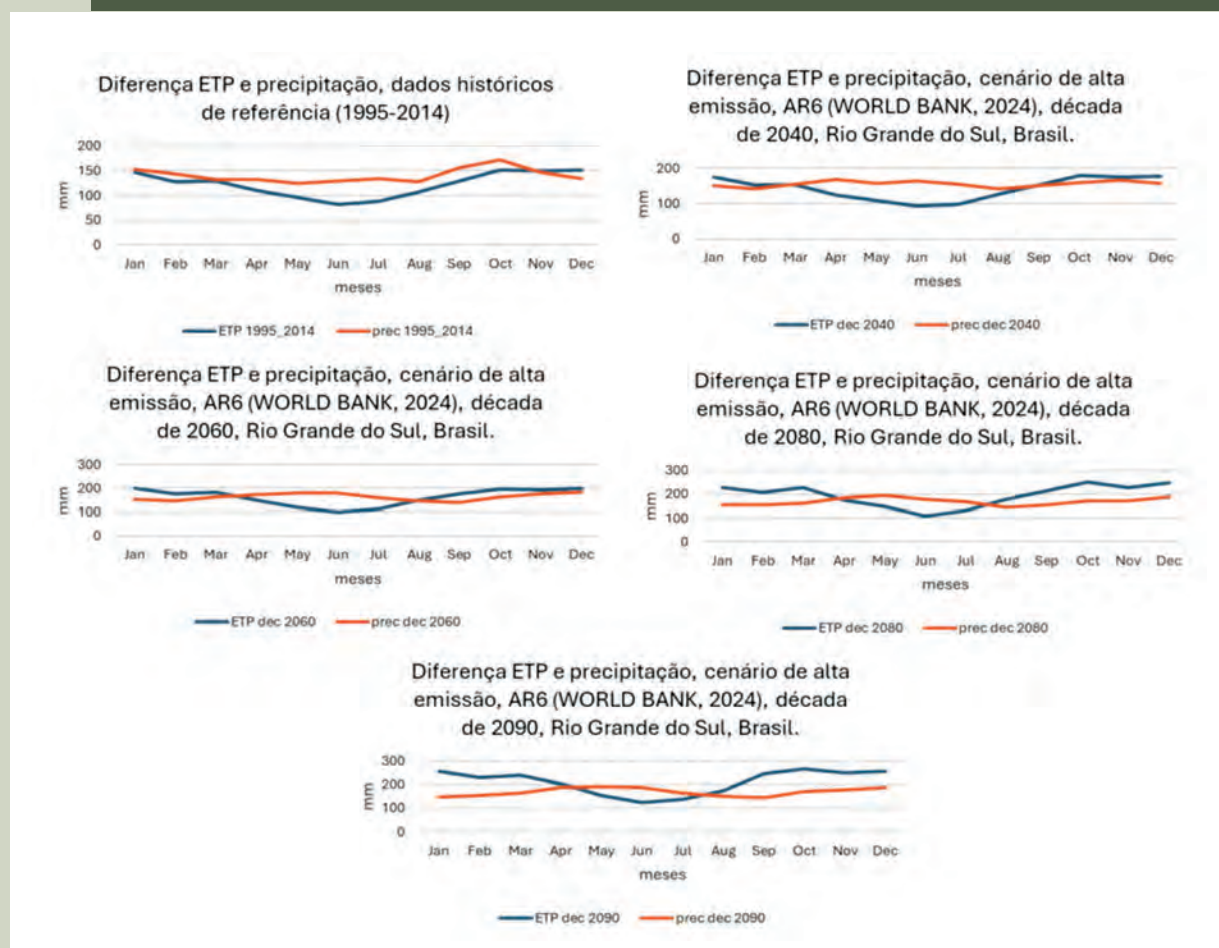
Fonte: Fuss et al. (2014).

chuva volta para a atmosfera, não restando para armazenar no solo, na biomassa ou infiltrar e alimentar os aquíferos, ou escoar superficialmente. A ETP foi calculada pelo método de Thornthwaite (Fontana, 1992) no R utilizando-se a função thornthwaite do pacote bioclim (Serrano-Notivol, 2023). Observa-se que a extensão do período em que a ETP ultrapassa em valores a P aumenta com os anos, passando de dois meses, no período de referência de valores negativos de P-ETP, para seis meses na década de 2040 e para nove meses na década de 2090. O aumento das estiagens será sentido já no curto prazo.

Apesar de haver aumento da precipitação nos cenários futuros, o efeito do aumento da temperatura faz com que a elevação da ETP tenha maior impacto, resultando em aumento do balanço negativo. As previsões do AR6 para cenários de alta emissão também informam que as precipitações serão mais intensas, concentradas, com maior número de dias entre elas, aumentando o risco de eventos extremos de inundações, movimentos de massa e aumento da ocorrência de estiagens.

Com base no cenário de alta emissão do AR6, foi elaborado um balanço hídrico

Figura 5. Diferença entre ETP e precipitação, Rio Grande do Sul, Brasil, para o período de 1995-2014 e as décadas de 2040, 2060, 2080 e 2090.



Fonte: os autores.

climatológico (BHC) para cada período dos cenários de referência e futuros. O BHC avalia como varia o excedente hídrico, o déficit hídrico e o armazenamento no solo, com base no armazenamento no solo (diretamente relacionado à sua profundidade, textura, estrutura e à profundidade que as raízes de cada cobertura vegetal exploram), da P e da ETP. O balanço permite avaliar como o armazenamento no solo e a mudança de cobertura vegetal mudam o uso dos resultados da diferença P-ETP. Os cálculos foram efetuados no R, utilizando o pacote ClimClass (Eccel; Cordano; Toller, 2022), para o cálculo do BHC, utilizando o método de Thornthwaite-Mather para a latitude -30.3439°S (São Gabriel, RS) e CADs de referência (Capacidade de Água Disponível, armazenamento de água até a profundidade efetiva de raízes da cobertura vegetal) de 100, 200, 300 e 400mm. Os Quadros de 1 a 4 apresentam os resultados, que mostram os componentes do balanço hídrico climatológico (armazenamento de água no solo, excedente e déficit hídricos) para as CADs de referência, considerando valores de P e ETP de acordo com o cenário de alta emissão. O aumento da temperatura eleva a ETP, deste modo, mesmo havendo aumento da P, não necessariamente ocorre aumento da disponibilidade de água, pois o aumento da ETP pode compensar esse aumento e resultar em aumento do déficit hídrico.

Observa-se que, para um mesmo cenário temporal, o aumento da CAD (Quadros 1, 2, 3 e 4) promove uma redução do excedente e aumento do déficit. Os triângulos invertidos mostram o padrão de redução de condições de disponibilidade hídrica no tempo e nas diferentes CADs de referência. Para CAD de 100mm, o déficit ocorre em um mês no período de referência, em cinco meses na década de 2040, enquanto, para CAD de 400mm, em oito meses. Os valores do excedente para uma

mesma CAD vão se reduzindo ao longo do tempo. Para a CAD de 100mm, no cenário atual temos nove meses com excedente. Na década de 2090, o esperado é três meses. Para a CAD de 200mm, no cenário de referência, nove meses de excedentes, mas esse número cairia para dois meses na década de 2080 e não ocorreria mais na década de 2090. No cenário atual, para CAD de 300mm, temos atualmente sete meses de excedentes, três meses na década de 2060, e, a partir da década de 2080, nenhum mês com excedentes. Considerando-se uma CAD de 400mm, partimos de seis meses de excedentes no cenário atual, três meses na década de 2040 e nenhum mês com excedentes a partir da década de 2060. Isso significa uma redução muito grande da disponibilidade de água para todos os usos humanos, desde o abastecimento de água para as populações, para dessedentação animal, para a irrigação, para a geração de energia nas hidrelétricas, para indústria, para manutenção da água em ambientes aquáticos, para garantia da disponibilidade de água nas outorgas, entre outras graves consequências em cadeia sobre toda a sociedade.

No balanço hídrico se diz: quando todos os espaços disponíveis para armazenamento de água no solo estão preenchidos, que ele se encontra em capacidade de campo (p.e., encontram-se 100mm de água no solo para uma CAD de 100mm). Com o aumento do número de meses com déficit hídrico, mesmo em cenários utilizando uma CAD maior, como 400mm, pode não haver água disponível para encharcar todo o perfil do solo e levá-lo à capacidade de campo.

Para a CAD de 100mm, temos oito meses em capacidade de campo (volume de água armazenado igual ao valor da CAD) no cenário atual e um mês na década de 2090. Para a CAD de 200mm, também oito meses no cenário de referência, dois meses na década de 2080

e nenhum na década de 2090. Para a CAD de 300mm, cai para sete meses em capacidade de campo no cenário atual, dois na década de 2080 e nenhum na de 2090. No balanço hídrico com CAD de 400mm, há 6 meses em capacidade de campo (CAD=400mm) no cenário atual, um único mês na década de 2060 e nenhum nas décadas de 2080 e 2090. Ou seja, mesmo que práticas agroecológicas de manejo de solos sejam efetivamente implementadas até as últimas décadas do século XXI, não haverá garantia de que a capacidade de armazenamento vai ser preenchida pela água disponível.

O grave quadro apresentado, que aponta para a redução da disponibilidade de recursos hídricos, demonstra que os impactos significativos já começam a se tornar realidade, com intensificação dos eventos extremos. Pelinson (2023) demonstrou como as secas de 2019 e 2020 resultaram em situação de emergência para 394 municípios gaúchos. O autor não encontrou relação entre esses eventos de seca e o fenômeno La Niña.

Cruz (n. publ.), estudando a bacia do Rio Vacacaí, UPGs³ do Alto, Médio e Baixo Vacacaí, efetuou balanço hídrico sequencial (BHS)

Quadro 1. Projeções de mudança do Balanço Hídrico Climatológico, CAD de 100mm, para o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, para o período de referência (1995-2014) e as décadas de 2040, 2060, 2080 e 2090. Quantis de 50%.

Período	BHC (mm) CAD 100mm	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1995-2014	Armazenamento	88.9	95.3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.7	81.6
	Excedente	0.0	1.7	5.4	21.5	31.5	47.0	49.6	23.7	26.3	25.7	0.0	0.0
	Déficit	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
década de 2040	Armazenamento	50.3	39.8	45.6	87.5	100.0	100.0	100.0	100.0	95.5	82.1	73.7	61.9
	Excedente	0.0	0.0	0.0	29.5	51.5	69.6	61.3	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	20.5	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	2.2	5.4
década de 2060	Armazenamento	25.2	15.7	13.2	35.0	97.7	100.0	100.0	100.0	69.0	53.5	44.0	38.2
	Excedente	0.0	0.0	0.0	23.2	59.9	78.2	46.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	44.2	32.6	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	35.9	31.2	17.5	16.8
década de 2080	Armazenamento	3.0	1.5	0.8	8.8	59.0	100.0	100.0	74.8	40.8	19.9	10.9	6.1
	Excedente	0.0	0.0	0.0	9.8	46.7	70.8	35.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	73.5	55.4	65.3	0.0	0.0	0.0	0.0	33.4	59.0	78.2	57.4	60.4
década de 2090	Armazenamento	1.0	0.4	0.2	0.2	40.0	99.6	100.0	80.3	28.1	11.6	5.4	2.8
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	36.2	60.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	107.4	74.9	75.1	17.0	0.0	0.0	0.0	26.3	102.6	95.0	73.3	68.0

Fonte: os autores.

Quadro 2. Projeções de mudança do Balanço Hídrico Climatológico, CAD de 200mm, para o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, para o período de referência (1995-2014) e as décadas de 2040, 2060, 2080 e 2090. Quantis de 50%, exceto onde indicado 100%.

Período	BHC (mm) CAD 200mm	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1995-2014	Armazenamento	188.5	194.9	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	195.8	181.3
	Excedente	0.0	1.3	5.4	21.5	31.5	47.0	49.6	23.7	26.3	25.7	0.0	0.0
	Déficit	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.2
década de 2040	Armazenamento	143.3	128.0	133.8	175.7	200.0	200.0	200.0	200.0	195.5	181.7	172.5	158.5
	Excedente	0.0	0.0	0.0	17.7	51.5	69.6	61.3	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	20.5	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.1	1.4	3.2
década de 2060	Armazenamento	102.6	81.6	75.1	96.8	159.5	200.0	200.0	200.0	167.1	147.7	134.3	125.5
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	22.2	77.8	50.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	41.0	25.6	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	5.7	5.9	5.0
década de 2080	Armazenamento (Q100%)	156.5	109.9	81.9	89.9	140.0	200.0	200.0	173.8	129.5	91.6	68.4	51.8
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.8	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	69.9	61.8	53.8	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	18.6	35.2	37.9	41.2
década de 2090	Armazenamento (Q100%)	132.8	84.0	59.8	54.4	94.2	153.8	181.8	163.5	98.3	64.2	44.3	32.3
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	103.3	87.9	66.8	18.5	0.0	0.0	0.0	8.2	55.8	61.7	61.0	55.3

Fonte: os autores.

Quadro 3. Projeções de mudança do Balanço Hídrico Climatológico, CAD de 300mm, para o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, para o período de referência (1995-2014) e as décadas de 2040, 2060, 2080 e 2090. Quantis de 50%, exceto onde indicado 100%.

Período	BHC (mm) CAD 300mm	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1995-2014	Armazenamento	281.3	287.7	293.1	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	294.2	274.1
	Excedente	0.0	0.0	0.0	21.5	31.5	47.0	49.6	23.7	26.3	25.7	0.0	0.0
	Déficit	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
década de 2040	Armazenamento	220.8	199.1	204.9	246.8	298.3	300.0	300.0	300.0	293.9	274.7	261.9	242.3
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	49.8	69.6	61.3	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	20.5	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
década de 2060	Armazenamento	162.4	131.6	121.9	143.6	206.3	284.1	300.0	300.0	254.3	227.0	208.1	195.5
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	62.0	50.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	41.0	15.7	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.2
década de 2080	Armazenamento (Q100%)	239.5	173.0	132.0	140.0	190.2	260.6	300.8	263.7	201.2	146.4	111.9	86.6
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	69.9	60.8	53.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	20.2	35.7	37.6	40.6
década de 2090	Armazenamento (Q100%)	205.9	135.2	98.8	90.7	130.5	190.1	218.0	197.8	123.9	83.7	59.5	44.5
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	103.3	87.2	66.3	18.4	0.0	0.0	0.0	9.0	57.8	61.8	60.6	54.8

Fonte: os autores.

Quadro 4. Projeções de mudança do Balanço Hídrico Climatológico, CAD de 400mm, para o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, para o período de referência (1995-2014) e as décadas de 2040, 2060, 2080 e 2090. Quantis de 50%, exceto onde indicado 100%.

Período	BHC (mm) CAD 400mm	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1995-2014	Armazenamento	341.6	348.0	353.4	374.9	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	384.9	334.4
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	31.5	47.0	49.6	23.7	26.3	25.7	0.0	0.0
	Déficit	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
década de 2040	Armazenamento	217.9	177.4	183.2	225.1	276.7	346.3	400.0	400.0	383.9	335.9	305.5	261.8
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.9	61.3	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
década de 2060	Armazenamento	331.4	218.4	187.5	209.2	271.9	349.7	399.8	400.0	288.3	230.1	193.6	171.2
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	41.0	20.6	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
década de 2080	Armazenamento (Q100%)	255.9	134.4	78.6	86.6	136.7	207.1	246.7	191.0	111.8	59.5	34.9	21.0
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	69.9	68.2	58.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	34.3	42.5	47.1
década de 2090	Armazenamento (Q100%)	189.8	82.4	44.3	37.3	77.1	136.7	164.7	135.7	53.7	24.7	12.6	7.1
	Excedente	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Déficit	103.3	91.9	68.9	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.9	64.2	66.1	59.8

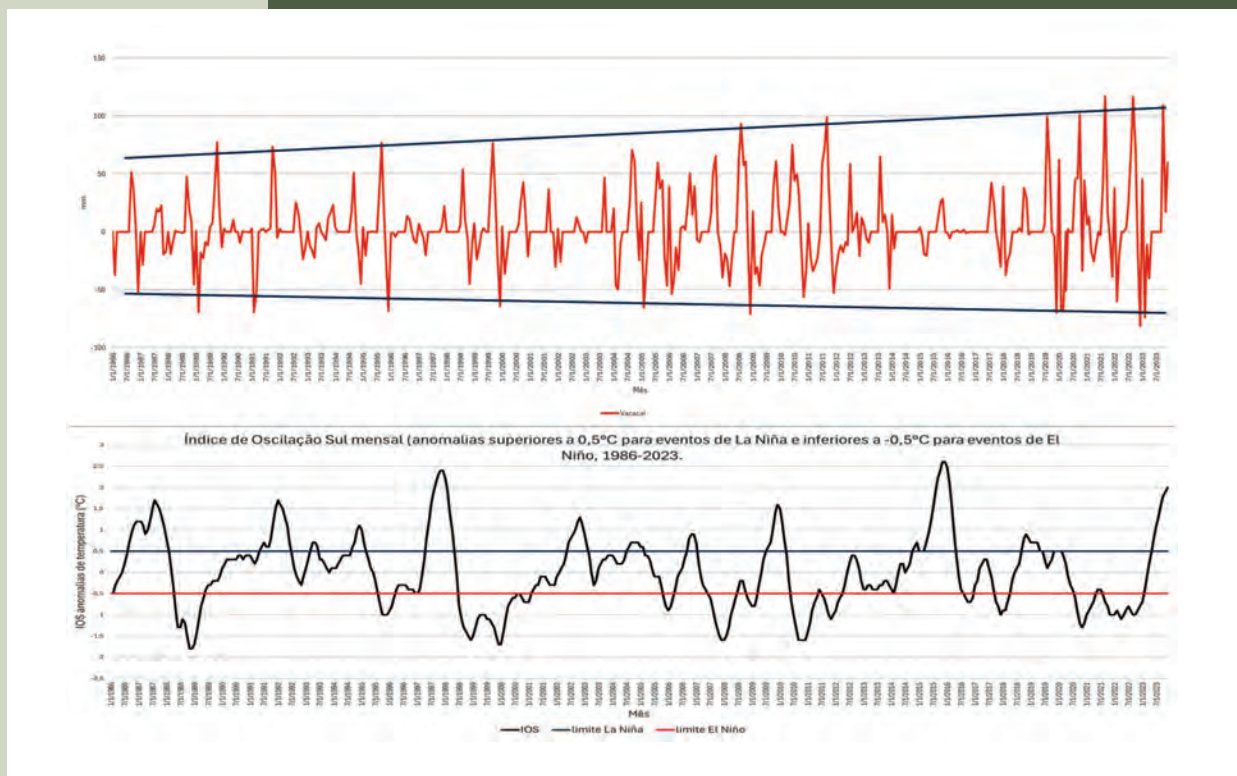
Fonte: os autores.

comparando os resultados do BHS, onde a CAD foi estimada com base nos mapas anuais de cobertura da terra e outro modelo considerando a CAD correspondente à cobertura da terra no ano de 1985 como constante. O objetivo foi avaliar o que seria o BHS se não houvesse mudança na cobertura da terra (Figura 6). De fato, a diferença entre os dois BHSs se mostra relacionada à mudança na cobertura da terra, já que ETP e P foram as mesmas.

Também se compararam as diferenças com o Índice de Oscilação Sul (IOS), que expressa a

diferença de pressão atmosférica entre o Taiti (Pacífico Central) e Darwin (norte da Austrália) e está correlacionado com os eventos de El Niño (aquecimento) e La Niña (resfriamento) na costa oeste da América do Sul. Segundo Berlatto e Fontana (2003), há um aumento do déficit hídrico em anos de La Niña e um aumento das precipitações em anos de El Niño no Pampa. Até o início de 2004, existia um padrão de periodicidade das diferenças no déficit hídrico. A partir daí, há mudança no padrão, com alta frequência e maiores intensidades, em especial de 2020 ao presente. Esse padrão de

Figura 6. Déficit hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí, UPGs Alto, Médio e Baixo Vacacaí, nos cenários histórico e de referência (cobertura da terra de 1985 como constante), 1986-2023. Valores positivos: déficit aumentou em relação à cobertura de 1985. Índice de Oscilação Sul mensal (IOS), 1986-2023.



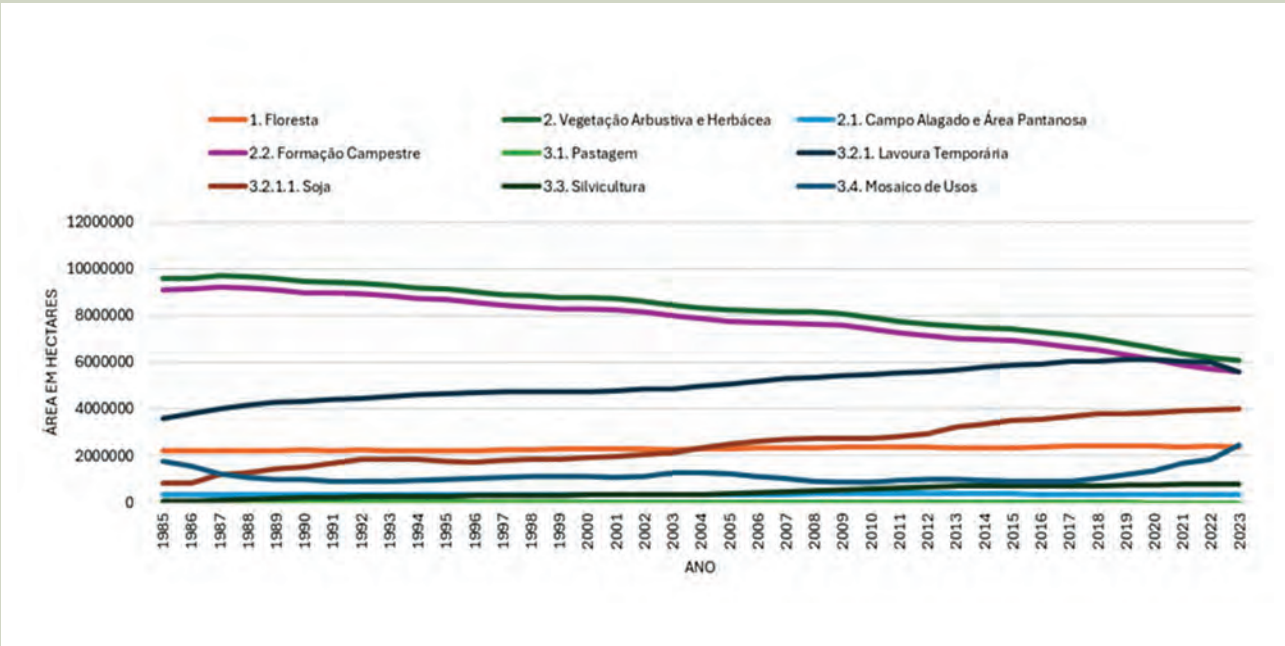
Fonte: Cruz (n. publ.)

aumento na intensidade e frequência, assim como alternância de padrões diferentes, vista nas diferenças do déficit hídrico, não ocorrem com o IOS. Embora o IOS esteja relacionado ao déficit hídrico, aumentando em anos de La Niña, se esse fosse o único fator para explicar as diferenças encontradas no déficit hídrico na Figura 6, haveria uma correspondência entre os maiores valores do IOS e os valores das diferenças no déficit hídrico, também deveria haver o mesmo padrão de aumento das intensidades das diferenças, realçadas com as linhas pretas no IOS. Assim, não se explica a mudança nos padrões de déficit hídrico somente pela variabilidade

climática relacionada aos fenômenos de El Niño e La Niña. Desse modo, a mudança climática e a mudança na cobertura da terra se apresentam como as explicações mais plausíveis, pois as linhas de tendência observadas na Figura 6 acompanham as mudanças no uso e cobertura da terra apresentadas na Figura 7.

A Figura 7 mostra a mudança da cobertura da terra no Pampa. Entre 2003 e 2004 a soja apresentou um aumento de cobertura em oposição à queda da cobertura de formação campestre, mesmo período aproximado da mudança de comportamento das diferenças do déficit hídrico, o que fortalece a hipótese de relação entre mudan-

Figura 7. Cobertura da terra no bioma Pampa brasileiro, coleção MapBiomias 9, 1985 a 2023.



Fonte: MapBiomias (2024c).

ças no uso da terra e o déficit hídrico. A alteração da cobertura teve efeitos sobre a CAD na bacia do Rio Vacacaí (Cruz, n. publ.).

Tabela 1. Estatísticas descritivas da CAD na Bacia do Rio Vacacaí, RS, Brasil, UPGs Alto, Médio e Baixo Vacacaí, para os anos de 1985 e 2022.

Ano	Média	Máximo	Desvio padrão
1985	73,7 mm	325,8 mm	47,6 mm
2022	57,8 mm	485,0 mm	57,8 mm

Fonte: Cruz (n. publ.).

A Tabela 1 apresenta a CAD e suas estatísticas descritivas para os anos de 1985 e 2022. Observa-se que durante o período houve uma diminuição na CAD média para a bacia e um aumento da variabilidade, expressa pelo desvio padrão. Também se pode verificar que, em ambos os anos, possui a maior parte da área

com valores de CAD inferiores a 100 mm, o que significa que a fragilidade socioambiental é ainda maior do que a prevista no cenário de balanço hídrico apresentado no Quadro 1. Como se considerou constância nas diferentes classes de mapeamento de solos, a mudança na CAD é devida à mudança na cobertura da terra. A direção da tendência do agronegócio, convertendo áreas de vegetação campestre em áreas de soja, principalmente (MapBiomias, 2024c), induziu uma redução na capacidade de enfrentamento das mudanças climáticas na Bacia do Rio Vacacaí, pois reduziu a CAD média da bacia em função da mudança na cobertura. Observa-se, portanto, que as mudanças climáticas tendem a produzir impactos que estão em contradição com o modelo de desenvolvimento baseado em monoculturas. O aumento de temperatura acelera a velocidade das reações químicas e a decomposição da matéria orgânica, bem como aumenta a evaporação direta dos corpos de água

e do solo e a transpiração das plantas, em uma escala que anula o aumento das precipitações, que serão maiores, mas mais concentradas e intensas, favorecendo aumento dos processos erosivos, catástrofes naturais.

Portanto, o padrão mais provável das mudanças nos remete para cenários de aumento dos déficits hídricos, aumento da intensidade das enchentes e da frequência de movimentos de massa, mudanças rápidas nas associações de espécies através de extinções locais, redistribuição geográfica por dispersão e introdução de espécies exóticas, o que poderá levar os ecossistemas a perda de estabilidade, favorecendo, entre outros problemas, a proliferação de espécies praga e de doenças. Tudo isso tem o potencial de inviabilizar o modelo de agronegócio de monoculturas em curto prazo, do ponto de vista da velocidade com que a sociedade pode se preparar para o enfrentamento. As consequências poderão ser catastróficas na economia, na inviabilização de sistemas de seguros agrícolas, na geração de empregos, nos serviços especializados de suporte ao agronegócio, na indústria e sistemas logísticos. Dessa maneira, para se mitigar seus graves efeitos, torna-se necessário um grande processo de negociação política entre os interesses do movimento da economia e do contramovimento socioambiental (Becker; Wittman, 2010).

Como impedir o colapso do bioma Pampa?

Experiências em diferentes países têm demonstrado que os esforços para enfrentamento de desastres (Kobiyama *et al.*, 2023; Jumiyati *et al.*, 2024), como de obtenção de resiliência na agricultura (Jumiyati *et al.*, 2021), envolvem um esforço de todos os agentes de desenvolvimento, pressupondo responsabilidades compartilhadas.

A base do sistema civilizatório está no meio rural, pois de lá vêm os alimentos, matérias-primas, minerais e outros recursos que sustentam a forma de viver. Jumiyati *et al.* (2021) demonstraram como sistemas agroflorestais, baseados na agroecologia, podem cumprir com os objetivos de estabilidade e adaptação do sistema socioambiental e ao mesmo tempo melhorar a renda das comunidades.

No Pampa, estudos demonstram que a pecuária, sob manejo ecológico de pastagens, tem potencial para reduzir as emissões de GEE (Roberti *et al.*, 2024), aumentar a infiltração e armazenamento de água no solo, podendo contribuir para a redução dos impactos das mudanças climáticas (Viana *et al.*, 2024). No entanto, a concentração de terras no bioma é grande e os projetos de assentamentos da reforma agrária possuem tamanho de lotes que não viabilizam a pecuária familiar baseada em manejo ecológico de pastagens (Rocha; Zanella; Cruz, 2015, Rocha *et al.*, 2017). Com a velocidade com que se perde vegetação campestre, torna-se urgente que as áreas de campo passem por transição agroecológica. Já as áreas convertidas para agroecossistemas, que já ultrapassam as áreas de formações campestres no bioma Pampa, em especial para o agronegócio da soja, a partir da década de 2001-2010 (Figura 7), devem passar por transição agroecológica⁴, buscando aumentar a infiltração, o armazenamento de água no solo e na biomassa, aumentar a interceptação da precipitação, para aumentar a resiliência frente às estiagens e mitigar a geração de escoamento superficial nos eventos extremos.

O Pampa é muito diverso, não existindo modelo único válido para todo ele. As soluções devem ser construídas para cada realidade, o que demanda esforços conjuntos e integrados das instituições e das comunidades. A base teórica para essa construção é conhecida quanto aos aspectos intrínsecos ao sistema solo-água-planta-atmos-

fera. Percebe-se um complexo processo em que se interrelacionam atributos físicos, químicos e biológicos dos mesmos (Reichardt; Timm, 2012).

Dessa forma, são inúmeros fatores que influenciam a disponibilidade de água no solo. Um fator que pode ser alterado através do manejo do solo e do uso de cultivares com sistema radicular profundo é o volume de solo explorado pela planta, ou seja, quanto melhor a condição do solo e da cultura para permitir a penetração e desenvolvimento radicular no solo, maior é o volume de água que a planta tem para consumir. Assim, subentende-se que se a água não chegar até a superfície, as raízes terão que crescer até encontrá-la. A Figura 8 representa uma CAD de 1mm/cm (ou seja, a cada cm em profundidade explorado pela raiz, a planta encontra 1 litro de água por m²), o que proporciona, em uma situação em que a planta explora uma profundidade de 20 cm de solo (S1), quatro dias até o esgotamento para chegar ao Ponto de Murcha Permanente (PMP), em uma condição de evapotranspiração de 5 mm/dia. Já, na condição em que a planta explora 80 cm (S3), são 16 dias até o esgotamento. Dentro dessa lógica e considerando precipitações com frequências mais prováveis de ocorrerem a cada oito dias ou mais e dificilmente a cada quatro dias, a situação “S1” de quatro dias comprometeria a sobrevivência da planta.

Considerando cenários futuros que preveem chuvas mais volumosas em eventos cada vez mais espaçados no tempo, sugere-se que as medidas de mitigação foquem em espécies e ou variedades com sistema radicular cada vez mais profundo e em manejos que favoreçam a penetração e desenvolvimento radicular, bem como a infiltração e armazenamento de água no solo.

De forma direta e em itens, Reichardt e Timm (2022) descrevem os fatores ligados à disponibilidade de água no solo:

Fatores que influenciam a disponibilidade de água no solo:

- Textura do solo: Solos arenosos retêm menos água do que solos argilosos;
- Estrutura do solo: Solos com estrutura granular retêm mais água do que solos compactados;
- Profundidade do solo: Solos profundos retêm mais água que solos rasos;
- Capacidade de infiltração: Solos com alta capacidade de infiltração absorvem mais água;
- Umidade relativa: Altas taxas de umidade relativa reduzem evapotranspiração;
- Temperatura: Altas temperaturas aumentam a evapotranspiração;
- Precipitação: Quantidade e distribuição da chuva afetam a disponibilidade de água;
- Topografia: Solos em áreas inclinadas perdem água por escoamento superficial.

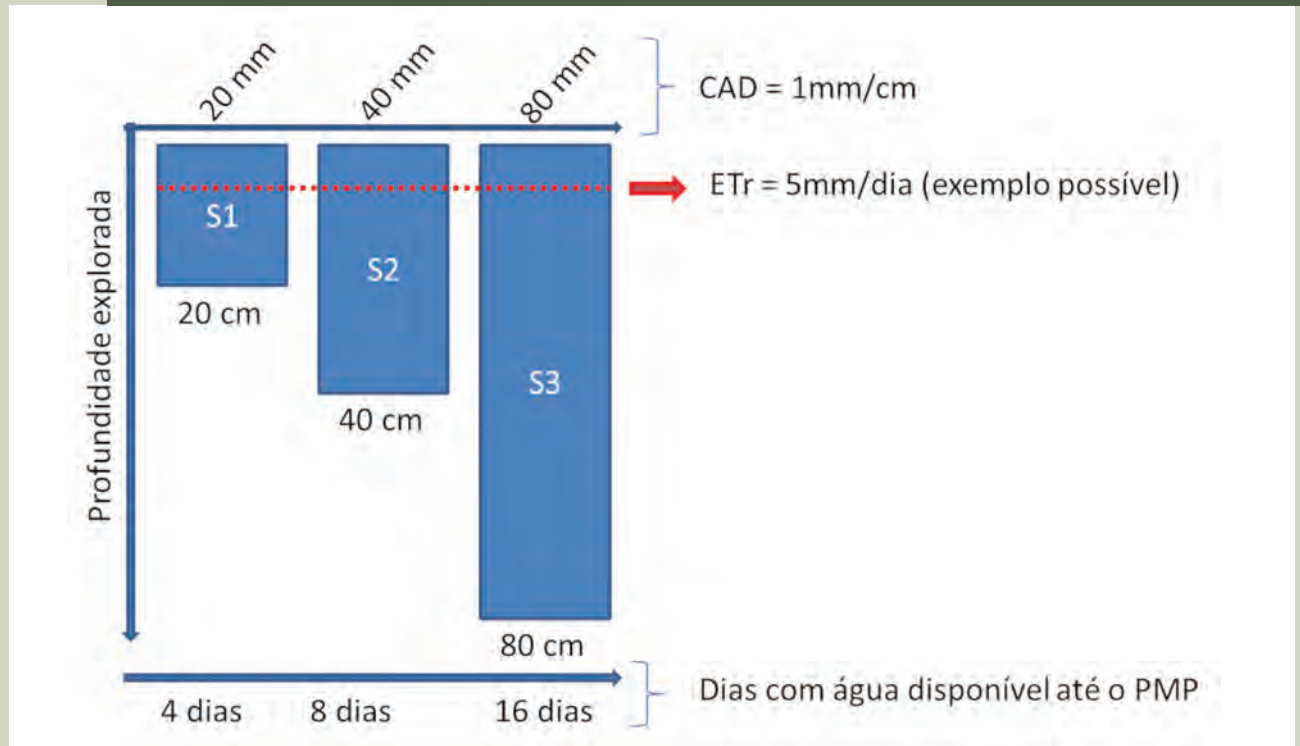
Causas de redução da disponibilidade de água no solo:

- Desmatamento: Reduz a infiltração e aumenta o escoamento superficial;
- Compactação do solo: Reduz a capacidade de infiltração e aprofundamento de raízes;
- Erosão: Reduz a profundidade do solo e aumenta o escoamento superficial;
- Uso excessivo de água: Reduz a disponibilidade de água para as plantas;
- Mudanças climáticas: Alteram padrões de precipitação e temperaturas;
- Poluição do solo: Reduz a capacidade de infiltração e afeta a qualidade da água;
- Uso de agrotóxicos: Afeta a microbiologia do solo e reduz a disponibilidade de água.

Efeitos da redução da disponibilidade de água no solo:

- Redução da produtividade agrícola: Afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas;
- Perda da biodiversidade: Afeta habitats e ecossistemas;

Figura 8. Esquema simulando Capacidade de Água Disponível (CAD) de 01 mm/cm em um solo qualquer, sob 3 condições de profundidade, mostrando número de dias até o esgotamento ou ponto de murcha permanente (PMP).



Fonte: os autores.

- Erosão do solo: Aumenta o risco de deslizamentos e perda de solo fértil;
- Redução da qualidade da água: Afeta a saúde humana e animal;
- Impacto econômico: Afeta a agricultura, pecuária e indústria;
- Conflitos sociais: Disputas por recursos hídricos;
- Mudanças ambientais: Alteram ecossistemas e afetam serviços ambientais.

Soluções para melhorar a disponibilidade de água no solo:

- Conservação do solo: Técnicas de conservação reduzem a erosão;
- Irrigação eficiente: Uso racional da água;
- Revegetação: Reflorestamento e

restauração de áreas degradadas;

- Manejo integrado de recursos hídricos: Planejamento e gestão sustentável;
- Agricultura sustentável: Práticas agrícolas sustentáveis reduzem impactos ambientais;
- Educação e conscientização: Promover práticas sustentáveis.

No entanto, a efetiva aplicação desses princípios demanda não somente a visão de sistemas solo-água-planta-atmosfera. O conhecimento somente é aplicado quando é demandado pela sociedade. Para que essa demanda ocorra, é necessário se pensar em termos de solo-água-planta-fauna-atmosfera-sociedade. Para tal, a integração e produção coletiva de conhecimentos e saberes devem envolver não

somente a ciência institucionalizada, mas, também, os saberes das populações tradicionais (Fellows; Vale, 2024), que, através da seleção cultural (Glenn, 2016), foram se adaptando às diversas mudanças do ambiente (Cruz; Guadagnin, 2010). Assim, o banco de dados para a adaptação está não somente na base genética e bioquímica presente na memória da biota, mas, também, no acervo de saberes acumulados pelas comunidades. Não basta pensar em adotar novas tecnologias para a adaptação do sistema às mudanças climáticas, é necessário pensar em mudança de modelo civilizatório⁵, que passa pela construção de modelos endógenos de desenvolvimento regional, pela formação e capacitação de pessoas para serem agentes desse novo modelo de desenvolvimento, capazes de conduzirem a construção de uma verdadeira inovação socioambiental.

Como abordar o problema?

Uma verdadeira inovação socioambiental⁶ necessita o fim de um modelo em crise, que possa a ser substituído por um novo. Isso envolve mudanças nos paradigmas do modelo civilizatório. No Pampa atual, há um crescimento das monoculturas agrícolas que se tornaram dominantes na economia regional (Figura 7). Porém, o sistema, em função das relações de dependência com o sistema agroindustrial (Chã, 2016, Pinheiro; Fernández, 2023), tem dificuldades de mudar, levando a uma tendência cultural conservadora (Amaral Jr.; Becher, 2022). A construção de uma cultura contra-hegemônica passa por construir processos de mudança cultural que permitam que haja mais futuro e menos passado no planejamento, com apropriação social de processos de construção



A redução da disponibilidade de recursos hídricos traz impactos significativos para o Pampa.

de modelos do futuro, que permitam processos participativos, democráticos, de tomada de decisões que possam antecipar e prevenir os impactos das mudanças climáticas.

No entanto, modelos de previsões do futuro não são adivinhações, mas projeções de comportamentos futuros possíveis obtidos com base nas restrições impostas pelo que ocorreu ao longo do passado até o presente. Em um quadro de incertezas sobre os rumos que os sistemas tomam em resposta aos regimes de perturbações que os atingem, o comportamento somente pode ser previsto para períodos curtos (Burel; Baudry, 2002). O convívio com a incerteza envolve o manejo adaptativo (Lee, 1999), onde se fazem previsões com base no monitoramento. Após as previsões serem efetuadas, realiza-se o ajuste do previsto em relação aos dados medidos e verifica-se a necessidade de otimização nos modelos ou na coleta de dados. A cada passo, se verifica a qualidade dos modelos e se compara, após um tempo, qual dos cenários previu melhor a realidade. Nesse processo, o objetivo ou finalidade do processo é a sustentabilidade socioambiental. No entanto, o modelo atual baseado na monocultura, em especial da soja, tem promovido uma perda de capacidade de adaptação às mudanças climáticas no Pampa, o que é incompatível com a finalidade da sustentabilidade socioambiental (Tabela 1 e Figura 6).

Porém, transformar esse potencial de antecipação em políticas públicas envolve negociação social. Becker e Wittman (2010) demonstram que as possibilidades do desenvolvimento regional sustentável dependem de como as contradições do sistema capitalista são negociadas. Para tal, as forças do contramovimento do social, ligadas historicamente ao lugar e à região e interessadas na permanência de condições adequadas de qualidade de vida para si e para as próximas gerações, devem se

contrapor e, por intermédio da mediação política, estabelecer condições para uma negociação do tipo ganha-ganha com o capital. Pode-se afirmar que a possibilidade de adaptação envolve mudanças na sociedade como um todo, indo além da modernização tecnológica. A modernização tecnológica pode ser diferentemente apropriada, levando em consideração os interesses ligados à acumulação do capital ou a serviço da vida e da sustentabilidade, e o caminho passa pela mediação política entre os diferentes grupos sociais que estão em processo de negociação, viabilizando soluções que atendam tanto às demandas do movimento do capital como do movimento da sociedade.

Esse processo de negociação e construção de políticas públicas tem condições de contorno. O Pampa não é homogêneo, possui uma diversidade de sistemas ecológicos que se adaptam, dispersam, mudam em função das perturbações que enfrenta. Assim, não se busca, no contexto da adaptação a um sistema terrestre em mudança climática, a conservação *stricto sensu* dos sistemas existentes, mas, sim, a manutenção das condições de estabilidade e de manutenção dos serviços ambientais.

Existem dois tipos de estabilidade: a de resistência e a de resiliência. Resistência ocorre quando o sistema incorpora, ao longo de frequentes exposições ao longo de tempo suficiente, o regime de perturbações na sua estrutura e não sofre rupturas em função dos impactos delas. Resiliência ocorre quando o sistema sofre perturbações as quais não enfrenta frequentemente, causando rupturas com impactos significativos que colocam em risco sua estabilidade. O sistema é resiliente quando consegue se recuperar (Margalef, 2002). Pode-se fazer analogia entre resistência, ligada à adaptação, e resiliência, ligada à mitigação.

A partir desse quadro teórico, pode-se associar as medidas de adaptação às mudanças de uso e cobertura da terra quanto ao déficit hídrico; já para os excedentes hídricos, como a escala dos eventos extremos se dá em abrangência espacial situada além da governança regional e pela não existência de relações significativas da sua ocorrência com as mudanças na cobertura da terra (Cruz, n. publ.), as medidas devem ser de mitigação, voltadas à redução das consequências dos eventos climáticos extremos.

Segundo Schabbach *et al.* (2024), necessita-se de um sistema de governança dos riscos de desastres, que é um sistema que engloba instituições, normas, políticas e tudo o que envolve orientação, coordenação e supervisão do risco de catástrofes e suas relações com todas as políticas públicas com as quais apresenta relações. Envolve abordagens inter, transdisciplinares e interinstitucionais, o que envolve toda a complexidade emergente das relações entre os seres humanos e o seu ambiente, suas relações de troca de informações, materiais e fluxo de energia e a forma como os seres humanos se relacionam entre si para exercerem essa atividade.

Não existe mediação política sem agentes regionais de desenvolvimento que possam construir consensos para essa transformação, o que envolve mudanças na educação, formação e capacitação de profissionais, mudanças na assistência técnica e extensão rural, no direcionamento da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico, no planejamento socioambiental, envolvendo conservação e sistemas de produção, para cumprir serviços ambientais relacionados com o aumento do déficit hídrico, com a resistência do solo contra processos erosivos em áreas ribeirinhas e áreas de encostas sujeitas a movimentos de massa, com o aumento da probabilidade de inundações e deslizamentos, o que envolve mudanças no

uso e ocupação da terra, nos desenhos dos sistemas de produção agrícolas, voltados a aumentar o armazenamento de água no solo, aumentar a interceptação, reduzir a evaporação direta, aumentar a malha de raízes no solo, a deposição de matéria orgânica, aumentar a capacidade de infiltração, entre outras ações relacionadas ao manejo e transição agroecológica, que entram em conflito com o modelo dominante do agronegócio capitalista.

Reflexões conclusivas e recomendações de políticas públicas para enfrentamento da mudança climática com o foco no bioma Pampa

O Pampa, no Brasil, tem enfrentado eventos extremos em frequência e intensidade que não são explicados somente pela variabilidade climática, mas pela mudança no uso e cobertura da terra, com substituição de ecossistemas nativos por agroecossistemas baseados nas monoculturas e pela mudança climática induzida pela atividade humana. Existe carência de informações em várias áreas do conhecimento nesse bioma, e quando existente, é pontual, restrito a alguns temas ou com resolução espacial e temporal inadequada. Nesse quadro hegemônico, pecuaristas e agricultores familiares e populações originárias são marginalizados e não possuem extensões territoriais suficientes para, sozinhos, garantirem uma transição para um modelo sustentável. Uma transição agroecológica, que contemple os diversos interesses existentes nas relações socioeconômicas no Pampa, exige uma abordagem que resgate vínculos locais e comunitários, que recupere saberes tradicionais, que mantenha um foco em objetivos e financiamento de longo prazo e em um desenvolvimento sustentável. Para que isso seja possível, as políticas devem refletir



Fábio Pozzebom/Agência Brasil

Área afetada pela estiagem
na região do Pampa.

decisões, diretrizes, programas e projetos debatidos e construídos de forma democrática e participativa. Assim, as mudanças começam com ações na formação e capacitação de pessoas, em especial de docentes e extensionistas e na institucionalização das Conferências de Enfrentamento das Mudanças Climáticas em todos os níveis administrativos e com o financiamento das instituições para manutenção e ampliação das bases de dados para assessorar a construção coletiva das políticas públicas.

A situação atual, olhada de forma realista, impele a propor algumas ações de políticas públicas e recomendações técnico-científicas para que a sociedade pampiana possa enfrentar os impactos potenciais das mudanças climáticas.

A. Ações de mitigação relacionadas com o enfrentamento do aumento do déficit hídrico:

A1. Aumento do armazenamento de água no solo:

A1.1. Implantação de sistemas agroecológicos voltados a aumentar a profundidade de raízes e a incorporação de matéria orgânica em todo o perfil do solo, possibilitando o aumento da profundidade efetiva de raízes, a partir de políticas de financiamento que estimulem a transição agroecológica e desestimulem os cultivos que não se alinharem com essa diretriz.

A1.2. Linhas de financiamento de pesquisas e projetos de desenvolvimento bio e geotecnológicos voltados à identificação das

espécies que têm potencial para acelerar o processo de aumento do armazenamento de água no solo, tanto em sistemas de produção como em vegetação nativa.

B. Ações de mitigação relacionadas com o enfrentamento do aumento da precipitação total e da sua intensidade (acumulados maiores, mas mais concentrados):

B1. Aumento da interceptação:

B1.1. Implantação de sistemas agroecológicos desenhados para aumentar a interceptação e infiltração da água, com ênfase em sistemas agroflorestais, recuperação/restauração de áreas de florestas nativas, por meio de políticas de financiamento que estimulem a transição agroecológica dos sistemas de produção e políticas de pagamento de serviços ecossistêmicos que estimulem a restauração/recuperação de florestas nativas.

B1.2. Implantação de políticas públicas voltadas a recuperar/restaurar áreas úmidas e planejar, em escala de paisagem, sistemas de bacias de contenção e sistemas integrados de manejo de reservatórios com a finalidade de atenuar os picos de cheias.

B2. Aumento da resistência do solo à erosão:

B2.1. Implantação de sistemas agroecológicos e de sucessão assistida da vegetação nativa, desenhados para aumentar a malha de raízes finas no perfil de solo, visando aumentar a resistência do mesmo à erosão, com prioridade para encostas e áreas ribeirinhas com riscos de desastres naturais (movimentos de massa e enxurradas), com linhas de financiamento e programas de pagamento por serviços ecossistêmicos.

B2.2. Implantação de sistemas agroecológicos desenhados para proteger o solo da evaporação

direta, com utilização de cobertura morta com espessura adequada, por meio de linhas de financiamento e programas de pagamento por serviços ecossistêmicos.

As políticas de enfrentamento às mudanças climáticas devem estar assentadas na construção de respostas específicas para contextos singulares. Nesse quadro, o enfrentamento das mudanças climáticas demanda: 1) melhorar a capacidade para adequar o conhecimento, a extensão e a divulgação científica; 2) favorecer que os resultados e avanços nas pesquisas possam ser convertidos em ações locais por gestores públicos e privados; 3) que os mesmos passem por uma recontextualização pedagógica de cunho formativo para um combate eficaz às mudanças climáticas aceleradas.

Todavia, muitas das dinâmicas que envolvem uma reestruturação educacional necessária são retardadas pelo tradicionalismo e a não transversalidade dos processos formativos educacionais. Professores e técnicos devem enfrentar os desafios de como transformar suas práticas e métodos em abordagens atuais e mais eficientes, pois, segundo Delizoicov (2007), disponibilizar o saber científico em grande escala é um desafio que deve ser enfrentado em nossas práticas docentes e formativas. De acordo com Marchezini e Londe (2020), embora a educação tenha sido fortemente negligenciada no debate científico sobre as alterações climáticas, devemos reconhecer o setor educacional como a grande “chave”.

O processo de ensino-aprendizagem deve ser orientado como um instrumento de produção e transformação do conhecimento científico, com o intento de contribuir para a formação educacional consistente, e que leve em consideração questões importantes no contexto global e em sua própria realidade local. Segundo Freire (2014), torna-se cada vez mais

atual e imprescindível o sentido de abordagem que contemple de maneira singular a temática da prática de ensino-aprendizagem como processo formativo de sujeitos críticos, ativos e tomadores de decisão.

Assim, pode-se compreender a emergência de uma demanda reestruturante, que deva ser conduzida por intermédio do incremento de práticas educacionais e formativas: a) fundadas em princípios de transversalidade; b) que se caracterizem enquanto abordagens contextualizadas de conteúdos conceituais, procedimentais e atitudinais; c) que atinjam as múltiplas dimensões integrativas dos sujeitos em formação: pessoal, interpessoal, social e profissional; e d) que se efetivem dentro de um tratamento que articule a produção do conhecimento, da geração e apropriação de novas tecnologias, seus impulsos para readequação dos modos de produção e correspondentes impactos ambientais e climáticos.

Desse modo, propõe-se alcançar uma cultura integrada de redução de riscos de desastres, convergindo com os objetivos estabelecidos pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC; Brasil, 2012). Sendo o objetivo principal da PNPDEC a sinergia entre políticas públicas, com destaque para a integração com a Política Nacional de Educação Ambiental (Pnea; Brasil, 1999). Tal qual defendido por Santo, Cordeiro e Athanázio (2014), trata-se da necessidade de se estabelecer uma educação permanente como instrumento para a percepção e prevenção das catástrofes ambientais.

Uma carência instrucional, que atinge todos os níveis de escolaridade, se refere aos recursos e materiais didáticos e paradidáticos que contemplem conflito climático enquanto uma questão sociocientífica, que

permitam abordagens transdisciplinares e contextualizadas com enfoque na resolução de problemas, atrelando alfabetização científica. Esses recursos e materiais englobam desde o uso de novas tecnologias, práticas laboratoriais, como uma reinvenção do tratamento didático-metodológico trazido nos livros escolares. Desse modo, entende-se a necessidade do desenvolvimento e implantação de um programa de avaliação, seleção e produção de materiais didáticos e paradidáticos, os quais poderão constituir um instrumental básico para estruturação de novas práticas educativas que sejam mais eficientes na formação de sujeitos críticos, socioambientalmente responsáveis, comprometidos e cientificamente fundamentados em relação à transição socioeconômica e ambiental.

Deve-se investir na formação e direcionamento sociopolítico de licenciados e bacharéis que contemplem o desenvolvimento de conhecimentos experienciais alicerçados em práticas extensionistas. Destaca-se aqui a importância do exercício da extensão como um locus privilegiado de ressignificação dos conhecimentos científicos que, em interconexões com saberes-fazeres tradicionais, se desdobram em novos rumos para solução e resolução de problemas. A extensão universitária permite combinar esforços de informação e participação comunitária em processos educativos e formativos, tornando possível criar soluções mais sustentáveis e orientadas para as necessidades específicas de cada comunidade, em especial quando a própria comunidade e a escola local assumem o protagonismo em sua implementação e desenvolvimento. Assim, necessita-se de programas que contemplem as Diretrizes de Educação Ambiental Climática (Trajber; Brianezi; Biasoli, 2023), em especial as diretrizes 3 e 6: “A Promoção de metodologias participativas, práticas inovadoras e tecnologias

apropriadas alinhadas com processos educativos que engajem de forma ativa e inclusiva múltiplos atores sociais na proteção das suas comunidades com sustentabilidade socioambiental" e "A Educação Ambiental é educação cidadã, responsável, crítica e participativa, capaz de apoiar a tomada de decisões transformadoras [...], para promover intervenções diante de situações de risco e vulnerabilidade, inclusive as agravadas por eventos climáticos extremos".

Uma outra necessidade integrativa corresponde ao investimento e estruturação da formação docente dentro dos assentamentos e escolas técnicas agrícolas, esses com o enfoque num desenvolvimento sustentável agroecológico da região. Tal necessidade parte do entendimento paralelo de duas questões: 1) o setor rural é fundamental para a solução da problemática climática e ambiental do Pampa; e 2) a transição ecológica demanda a adoção de um paradigma agroecológico-florestal. Desse modo, deve-se pensar a Educação Ambiental Climática na formação de professores como processo estruturante e determinante para as transformações culturais profundas no enfrentamento dessa emergência climática (González-Gaudiano; Cartea; Pérez, 2020). Com base nessas reflexões, propõe-se:

C. Ações de adaptação socioambiental e educacional:

C1. Aumento da diversidade e resiliência socioambiental:

C1.1. Estímulo à diversificação da indústria e do setor de serviços para apoiar a transição agroecológica por meio de linhas de financiamento subsidiadas e competitivas.

C1.2. Implantação de políticas de formação e/ou capacitação de profissionais para o sistema

Ater, voltados para a transição agroecológica.

C1.3. Estímulo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento do potencial da biodiversidade do bioma Pampa na diversificação das redes de produção.

C1.4. Implantação de Núcleos Interdisciplinares e Interinstitucionais de Enfrentamento à Mudança Climática em todas as instituições públicas e de uma rede de integração e coordenação das mesmas por intermédio da Defesa Civil, em níveis municipal, regional, estadual e federal.

C1.5. Implantação efetiva das políticas públicas de educação ambiental, com obrigatoriedade da temática do enfrentamento da mudança climática, por meio de financiamento adequado.

C1.6. Obrigatoriedade da implantação, como tema transversal, do enfrentamento às mudanças climáticas em todos os Planos de Desenvolvimento Institucional das instituições de ensino, assim como nos planos políticos dos cursos e currículos em todos os níveis de ensino.

C1.7. Criação das Conferências Municipais, Estaduais e Federal de Enfrentamento à Mudança Climática, com o objetivo de negociação social de diretrizes e prioridades para as políticas públicas.

C1.8. Desenvolvimento de programas efetivos de formação docente dentro dos assentamentos e escolas técnicas agrícolas, tendo o enfoque num desenvolvimento sustentável agroecológico do Pampa.

C1.9. Suprir a carência instrucional no tangente à avaliação e produção de recursos e materiais didáticos e paradidáticos que contemplem conflito climático enquanto uma questão sociocientífica. Desse modo, permitir o desenvolvimento de abordagens

transdisciplinares e contextualizadas com enfoque na resolução de problemas, atrelando a alfabetização científica. Esses recursos e materiais devem englobar desde o uso de novas tecnologias, práticas laboratoriais, como uma reinvenção do tratamento didático-metodológico trazido nos livros escolares.

C2. Adaptação da política do Sistema Nacional de Unidades de Conservação:

C2.1. Revisão dos planos de conservação das UCs, visando adaptar os objetivos de conservação e seus instrumentos para as consequências das mudanças do clima sobre a disponibilidade de habitats para as espécies e sobre os ecossistemas alvos da conservação, a necessidade de deslocamento assistido, conectividade planejada em escala de paisagem, sucessão vegetal assistida e objetivos voltados à manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (conservar mudando).

A execução dessas políticas será potencializada a partir do atendimento de algumas demandas técnico-científicas. Tendo em vista o retardo entre a emissão dos relatórios do IPCC e a disponibilização de dados em escala adequada para o planejamento regional, recomenda-se que a rede interinstitucional de enfrentamento das mudanças climáticas do estado do Rio Grande do Sul seja instrumentada em termos de recursos humanos, prediais, equipamentos e serviços para efetuar o downscaling dos modelos globais para uma escala compatível com o cruzamento de planos de informação de cobertura e uso da terra. A rede deve ser capaz de estabelecer e atualizar um banco de dados de profundidade efetiva de raízes e de armazenamento de água no solo para os diferentes solos do estado, para as diferentes classes de cobertura e uso da terra e para

diferentes tipos de manejo do solo, bem como realizar estudos para localização, identificação e estudos ecológicos das espécies nativas que são resilientes ao déficit hídrico, implantar uma rede de produtores de mudas e sementes para a transição agroecológica. Para isso, a política de financiamento das ações de ensino, pesquisa e extensão dos órgãos públicos relacionadas com as ações de adaptação e mitigação das mudanças climáticas deve ser efetuada de forma integrada, estimulando o fortalecimento da rede interinstitucional de núcleos de enfrentamento das mudanças climáticas, de acordo com diretrizes estabelecidas nas conferências e através do financiamento institucional e não por meio de editais que estimulam a competição entre as instituições e limitam a cooperação entre elas. A rede pode ser construída com base em articulações da sociedade civil. Para tal, deve-se buscar o fortalecimento da Coalizão pelo Pampa e implementação das suas proposições (Coalizão pelo Pampa, 2022).

¹ Entre os estudos, encontram-se os efetuados pelos grupos de pesquisa da UNIPAMPA, como Cruz e Guadagnin (2010), Carvalho et al. (2014, 2015, 2019, 2020), Carvalho e Cruz (2016), Rocha, Carvalho e Cruz (2016), Gouvea et al. (2018), Souza et al. (2018), Carvalho, Cruz e Rocha (2019), Rocha et al. (2019, 2020a, 2020b, 2021), Marques et al. (2022), Souza, Silva e Cruz (2022), Souza e Cruz (2024), Cruz e Souza (2024).

² Os AR do IPCC são os Assessment Reports (Relatórios de Avaliação; IPCC, 2023).

³ UPG – Unidade de Planejamento e Gestão (Sema, 2025).

⁴ Transição agroecológica é o processo de conversão de um sistema convencional agrícola de altos subsídios para um sistema de baixa entrada de subsídios externos e é composto de quatro fases: 1) eliminação progressiva de insumos químicos, 2) racionalização do uso de agroquímicos através do manejo integrado de pragas e de nutrientes, 3) substituição de insumos agroquímicos por alternativas de baixa energia acumulada, 4) replanejamento, por meio da diversidade, dos sistemas agrícolas buscando um ponto ótimo na relação entre cultivos e animais, estimulando sinergias, buscando que o sistema subsidie sua própria fertilidade dos solos, regulação natural de pragas e produção dos cultivos (Altieri, 1999).

⁵ Para Ribeiro (1987), seria uma configuração específica de traços diagnósticos homogêneos referentes aos sistemas adaptativo, associativo e ideológico; "...constelação particular de certos conteúdos do seu modo de adaptação à natureza, de certos atributos

de sua organização social e de certas qualidades de sua visão de mundo" (Ribeiro, 1987, p. 43).

⁶ "...a inovação social pode ser definida como a implementação de novas soluções (sejam elas produtos, serviços ou modelos) que atendem a necessidades sociais de maneira mais eficaz e sustentável do que as soluções existentes, ao mesmo tempo em que criam valor para a sociedade como um todo. No contexto da sustentabilidade ambiental, as inovações sociais têm o potencial de transformar a maneira como comunidades e organizações enfrentam problemas complexos, como o uso de recursos naturais, o desperdício e a proteção da biodiversidade" (Revista Amazônia, 2024, n.p.); "A inovação ambiental ... engloba um conjunto de práticas e avanços voltados ao desenvolvimento de soluções que beneficiem o meio ambiente através da inovação. Este tipo de inovação busca a introdução de mudanças criativas e técnicas capazes de reduzir os impactos ambientais, promovendo um desenvolvimento sustentável" (Nonato, 2024).

Referências

- ALTIERI, M. A. *Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável*. Montevideo: Ed. Nordan-Comunidade, 1999. Disponível em: <https://archive.org/download/libro-agroecologia/libro-agroecologia.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- AMARAL JR., J. C.; BECHER, C. Extensão rural, agronegócio e conservadorismo: os limites de uma política pública para o campo. *Revista Trabalho Necessário*, v. 20, n. 43, 2022, p. 1-19. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/trabalhonecessario/article/view/54533/33226>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- BAEZA, S. et al. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: the Mapbiomas Pampa initiative. Remote sensing applications: *Society and Environment*, v. 28, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>.
- BECKER, D.; WITTMAN, M. (Orgs.). *Desenvolvimento regional: abordagens interdisciplinares*. 2 ed. Santa Cruz do Sul, RS: Edunisc, 2010.
- BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. *D.O.U.*, 11 abr. 2012, p. 1. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=lei&numero=9795&ano=1999&ato=b90QtQe9kenpWtc45>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul, aplicação de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=lei&numero=12608&ano=2012&ato=cf8etRu1kMVPwT18a>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- BUREL, F.; BAUDRY, J. *Ecología del paisaje: conceptos, métodos y aplicaciones*. Madrid: Ed. Mundi-Prensa Libros, 2002.
- CARVALHO, C. M. et al. Fragilidade ambiental frente ao uso do solo no alto Camaquã, RS. *Revista de Geografia*, [s. l.], v. 37, n. 1, 2020, p. 324-338. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/236352>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- CARVALHO, C. M.; CRUZ, R. C. *A pecuária familiar e a gestão dos recursos hídricos: um estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã*. v. 1. Londres: Novas Edições Acadêmicas, 2016. Disponível em: <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/978-3-330-73630-6>. Acesso em: 30 nov. 2024.
- CARVALHO, C. M. et al. Avaliação de impacto ambiental em nascentes do Alto Camaquã a partir de uma análise multivariada. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 6, n. 1, 2015, p. 202-212. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/SPC21796858.2015.001.0016/566>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- CARVALHO, C. M.; CRUZ, R. C.; ROCHA, N. S. O Alto Camaquã e a pecuária familiar: a construção da educação ambiental hídrica. *Revista Brasileira de Educação Ambiental*, [s. l.], v. 14, n. 1, 2019, p. 149-170. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/2612>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- CARVALHO, C. M. et al. Avaliação da vulnerabilidade ao risco de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Piratini, RS. *Revista Monografias Ambientais*, [s. l.], v. 13, n. 5, 2014, p. 3977-3985. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/15124>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- CARVALHO, C. M. A pecuária familiar e o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã: um estudo de caso. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 20, n. 71, 2019, p. 344-363. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/45715>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- CHÃ, A. M. J. *Agronegócio e indústria cultural: estratégias das empresas para a construção da hegemonia*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial na América Latina e Caribe – Ippri. São Paulo: Instituto de Políticas Públicas e Relações Internacionais, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Unesp, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/2b0ef04d-757c-4a34-9995-f83ed9a66f8f/content>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- COALIZÃO PELO PAMPA. *Carta aberta à sociedade gaúcha pela proteção do Pampa: diretrizes e ações para uso sustentável e conservação do bioma*. Disponível em: <https://oeco.org.br/wp-content/uploads/2022/07/carta-aberta-coalizacao-pampa.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- CRUZ, R. C.; GUADAGNIN, D. L. Uma pequena história ambiental do Pampa: proposta de uma abordagem baseada na relação entre perturbação e mudança. *A sustentabilidade da região da Campanha, RS: práticas e teorias a respeito das relações entre ambiente, sociedade, cultura e políticas públicas*. Santa Maria, RS: UFSM, 2010, p. 155-179. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264802896_uma_pequena_historia_ambiental_do_pampa_proposta_de_uma_abordagem_baseada_na_relacao_entre_perturbacao_e_mudanca. Acesso em: 30 out. 2024.
- CRUZ, R. C. Avaliação da mudança da cobertura da terra sobre o balanço hídrico sequencial na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí, RS, Brasil, nos anos de 1986 a 2023. [Artigo em redação, não publicado].
- CRUZ, R. C.; SOUZA, C. E. L. D. Estratégias para mitigação das mudanças climáticas no bioma Pampa. *Anais. II Congresso Internacional do Pampa: Dos Direitos da Natureza às*

- Catástrofes Climáticas. Santana do Livramento, RS: Universidade Federal do Pampa, 2024, p. 1-3. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/387970351_balanco_hidrico_climatologico_do_pampa_no_rio_grande_do_sul_projcoes_para_cenarios_de_alta_emissao. Acesso em: 13 jan. 2025.
- DEFESA CIVIL RS. *Municípios em situação de emergência por estiagem*– biênio 2022/2023. Porto Alegre: Defesa Civil RS, 2023. Disponível em: <https://defesacivil.rs.gov.br/municipios-em-situacao-de-emergencia-2020-21>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- DEFESA CIVIL RS. *Boletim –DGRD: lista municípios afetados*. Porto Alegre: Defesa Civil RS, 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/municipios-10-06-2024.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- DELIZOICOV, D. Pesquisa em ensino de Ciências como Ciências Humanas Aplicadas. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 21, 2004, p. 145-175. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6430/5946>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- ECCEL, E.; CORDANO, E.; TOLLER, G. *Package 'ClimClass'*. Cran, 2022. Disponível em: <https://cran.project.org/web/packages/ClimClass/index.html>. Acesso em: 2 out. 2024.
- FELLOWS, M.; VALE, S. do. *Os povos indígenas na luta contra as mudanças climáticas no Brasil: o distanciamento entre o Plano Nacional de Adaptação e as estratégias autônomas*. Debates Indígenas IWGIA, 2024. Disponível em: <https://debatesindigenas.org/pt/2024/11/01/os-povos-indigenas-na-luta-contras-as-mudancas-climaticas-no-brasil-o-distanciamento-entre-o-plano-nacional-de-adaptacao-e-as-estrategias-autonomas/?form=Mg0aV3>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- FONTANA, D. C. Determinação da evapotranspiração. BERGAMASCHI, H. (C.). *Agroclimatologia aplicada à irrigação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992, p. 48-84.
- FONSECA, E. L. et al. *Nota técnica. Os impactos do evento climático de maio de 2024 sobre a cobertura e o uso da terra no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1RY-osoWJ3tca_zk65nygbglgeqzhK7ze/view. Acesso em: 15 dez. 2024.
- FREIRE, P. *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. 48 ed. São Paulo: Paz e Terra, 2014.
- FUSS, S. et al. Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, v. 4, 2014, p. 850-853. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate2392>. Acesso em: 31 out. 2024.
- GLENN, S. S. Comportamento individual, cultura e mudança social. *Revista Brasileira de Análise do Comportamento*, [s.l.], v. 11, n. 2, dez. 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/rebac/article/view/4015>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- GONZÁLEZ-GAUDIANO, E. J.; CARTEA, P. Á. M.; PÉREZ, J. G. ¿Cómo educar sobre la complejidad de la crisis climática? Hacia un currículum de emergencia. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, v. 25, n. 87. Ciudad de México, 2020, p. 843-872. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344629337como_educar_sobre_la_complejidad_de_la_crisis_climatica. Acesso em: 17 jan. 2025.
- GOUVEA, L. H. A. et al. *Avaliação de conflitos de uso da terra em um projeto de assentamento da Reforma Agrária no bioma Pampa. Ciencias y Medio Ambiente: 56º Congreso Internacional de Americanistas*, 2018, Salamanca, Espanha. Memoria del 56º Congreso Internacional de Americanistas. Ciencias y Medio Ambiente, v.4, 2018. Salamanca, ES: Ediciones Universidad de Salamanca, p.347-360. Disponível em: https://doi.org/10.14201/0aQ0251_4.
- INPE/CPTEC. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/ CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. *Projeções de cenários climáticos*. Disponível em: <http://pnud.cptec.inpe.br/index.html#nogo>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- IPCC. *Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: <http://10.59327/IPCC/aR6-9789291691647>.
- JUMIYATI, S. et al. Economic and ecological adaptation to changes in agricultural land use to increase sustainable economic resilience. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 800, 2021. Disponível em: <http://10.1088/1755-1315/800/1/012049>.
- JUMIYATI, S. et al. Priority for improving disaster resilience at the higher education level: awareness, integration, and management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1306, 2024. Disponível em: <http://doi:10.1088/1755-1315/1306/1/012036>.
- KOBIYAMA, M. et al. Lições aprendidas com grandes desastres recentes causados por eventos hidrológicos extremos no Brasil. *Revista Geonorte*, v. 14, n. 46, 2023, p. 115-142. Disponível em: <http://10.21170/geonorte.2023.V.14.n.46.115.142>.
- LEE, K. N. Appraising adaptive management. *Conservation Ecology*, v. 3, n. 2, 3, 1999. Disponível em: <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art3/>. Acesso em: 10 dez/ 2024.
- MAPBIOMAS. *Projeto MapBiomas – Coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil*. 2024. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 31 out. 2024.
- MAPBIOMAS. *Proyecto Mapbiomas Pampa Trinacional – Colección 4 de la serie anual de mapas de cobertura y uso del suelo de Pampa trinacional*. 2024. Disponível em: https://pampa.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/9/2024/12/MBP_Col4_mapa_mural.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.
- MAPBIOMAS. *Toolkit para a emergência climática no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: MapBiomas, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas-workspace.earthengine.app/view/rio-grande-do-sul-climate-emergency-toolkit>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- MARCHEZINI, V.; LONDE, L. R. Looking to future perceptions about climate change in Brazil: What children's teachers think, learn and teach about?. *Natural Hazards*, v. 104, n. 3. Berlin, 2020, p. 2325-2337. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04274-4>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- MARGALEF, R. *Teoría de los sistemas ecológicos*. 2 ed. Barcelona: Ed. Alfaomega/Universitat de Barcelona, 2002.
- MARQUES, L. P. et al. *Pagamento por serviços ambientais: um*

- estudo no território do Alto Camaquã, RS. MOTA, D. A. *et al.* (Org.). *Meio ambiente: princípios ambientais, preservação e sustentabilidade*, v. 3. 3 ed. Ponta Grossa, PR: Atena, 2022, p. 133-148. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/61734>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- MCTI. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. *Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC*. Brasília: MCTI, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/painel-inter-governamental-sobre-mudanca-do-clima-ipcc>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Princípio da precaução*. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/7512-princ%C3%ADPIO-da-precau%C3%A7%C3%A3O.html>. Acesso em: 4 nov. 2024.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. *Parcerias Estratégicas*, n. 12, set. 2001, p. 239-258. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/impactos_ecossistemas_cnobre.pdf. Acesso em: 4 nov. 2024.
- NONATO, L. *Inovação ambiental: o que é, importância e exemplos*. Disponível em: <https://blog.aevo.com.br/inovacao-ambiental/>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- PELINSON, D. *Diagnóstico da seca 2019/2020 no estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/258280/001168959.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- PINHEIRO, M. J.; FERNÁNDEZ, V. L. Teoria marxista da dependência e sistema-mundo – o avanço do agronegócio da soja no Brasil. *Anais. XXVIII Encontro Nacional de Economia Política*. Maceió. XXVIII Encontro Nacional de Economia Política. Niterói, RJ: SEP, 2023, p. 61-61. Disponível em: https://enep.sep.org.br/uploads/2605_1678762534_pdf_com_nome_pdf_ide.pdf. Acesso em 20 jan. 2025.
- PLANETA CAMPO. *Mudanças climáticas: Carlos Nobre alerta para os impactos irreversíveis e o papel do Brasil no cenário global*. Disponível em: <https://planetacampo.canalrural.com.br/noticias/mudancas-climaticas-carlos-nobre-alerta-para-os-impactos-irreversiveis-e-o-papel-do-brasil-no-cenario-global/#:~:text=nobre%20destacou%20que%20o%20Painel,at%C3%A9%201%2C6%C2%B0C>. Acesso em: 2 out. 2024.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. 2 ed. Barueri, SP: Manole, 2012.
- REVISTA AMAZÔNIA. *Mensuração de impacto social: o caminho crucial da inovação social para a sustentabilidade ambiental*. Belém: Editora Círios, 2024. Disponível em: <https://revistaamazonia.com.br/impacto-inovacao-social-sustentavel/>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- RIBEIRO, D. *O processo civilizatório: etapas da evolução socio-cultural*. 9 ed. Petrópolis, RJ: Ed. Vozes, 1987.
- ROBERTI, D. R. *et al.* Sustainability in natural grassland in the Brazilian Pampa biome: livestock production with CO₂ absorption. *Sustainability*, v. 16, n.9, 2024, p. 3672. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16093672>.
- ROCHA, N. S.; CARVALHO, C. M.; CRUZ, R. C. Scenarios of drought caused by climate change: a case study of the watershed Alto-Camaquã. 2º Congresso Interamericano de Cambio Climático, 2016, Ciudad de México. *Anais. 2º Congresso Interamericano de Cambio Climático*, 2016, p. 546-550.
- ROCHA, N. S. *et al.* Análise do balanço hídrico climatológico da Sub-Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã, RS. *GEO Uerj*, [s. l.], n. 37, p. e 37723, 2020. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/37723>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- ROCHA, N. S. *et al.* Fragilidades ambientais do Alto Camaquã e vulnerabilidade dos pecuaristas familiares frente à disponibilidade hídrica. *Ra'Ega – O Espaço Geográfico em Análise*, [s. l.], v. 45, n. 1, 2019, p. 153-169. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/52267>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- ROCHA, N. S. *et al.* Potential impacts of air temperature rise in the hydric balance of Brazilian Pampa biome. *Acta Geophysica*, v. 69, 2021, p.1427-1445. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11600-021-00589-3>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- ROCHA, N. S. *et al.* Pampa biome environmental particularities regarding to energy balance. *IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference*, Santiago, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9165641>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- ROCHA, J. M. da; ZANELLA, F. C.; CRUZ, R. C. Análise da distribuição de terras nos assentamentos rurais da metade sul do Rio Grande do Sul: a perspectiva de uma sustentabilidade compatível. *Redes*, v. 20, n. 2, 2015, p. 213-235. Disponível em: <https://doi.org/10.17058/redes.v20i2.4014>.
- ROCHA, N. S. *et al.* Assentamentos rurais na metade sul do Rio Grande do Sul e a sua compatibilidade com o bioma Pampa: estudo no Assentamento São Joaquim. *Retratos de Assentamentos*, [s. l.], v. 20, n. 1, 2017, p. 164-185. Disponível em: <https://retratosdeassentamentos.com/index.php/retratos/article/view/260>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- SANTO, J. N. E.; CORDEIRO, B. C.; ATHANÁZIO, A. R. Educação permanente como um instrumento para a percepção de riscos e prevenção de desastres naturais biológicos em viagens para a prática desportiva. *Anais. III Congresso Internacional, I Simpósio Ilbero-Americano, VIII Encontro Nacional de Riscos. Multidimensão e Territórios de Risco*. Guimarães, 2014. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2014, p. 543-546.
- SCHABBACH, L. M. *et al.* As enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul e a capacidade de resposta dos municípios às inundações. *Redes (St. Cruz Sul Online)*, v. 29, 2024. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/redes/article/view/19566>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- SEMA. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA. *G060 – Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí-Vacacaí Mirim*. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/g060-bh-vacacai>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- SERRANO-NOTIVOLI, R. Package 'bioclim'. *Cran*, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/bergamas-chi>. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992, p.48-84.
- SOUZA, A. S. S. *et al.* A sustentabilidade do uso da água em assentamentos da Reforma Agrária: políticas públicas e poluição das águas. *Ciencias Y Medio Ambiente*. Memoria del 56º Congreso Internacional de Americanistas, 2018,

Salamanca, ES: Ediciones Universidad de Salamanca, v. 4, 2018, p. 361-376. Disponível em: https://doi.org/10.14201/0aQ0251_4.

SOUZA, C. E. L. D.; CRUZ, R. C. Balanço hídrico climatológico do município de Cacequi/RS, de 1985 a 2020: efeitos do fenômeno enos e da mudança na cobertura da terra. *Caminhos de Geografia*, v. 25, n. 100. Uberlândia, 2024, p. 15-33. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhos-degeografia/article/view/71000>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SOUZA, C. E. L. D.; SILVA, V. M.; CRUZ, R. C. Capacidade de água disponível no solo no bioma Pampa: efeito da cobertura da terra entre 1985 e 2020. PEREIRA, D.N. et al. (Orgs.). *Anais. III Ciência em Ação: Educar É Transformar*. Cajazeiras, PB: Edições AINPGP – Associação Internacional de Pesquisa na Graduação em Pedagogia, 2022, p. 217-222. Disponível em: <https://ainpgp.org/wp-content/uploads/2023/03/anais-III-ca2022.pdf>. acesso em: 10 dez. 2024.

TEBALDI, C. et al. Climate model projections from the scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth Syst. Dynam.*, v. 12, n. 1, 2021, p. 253-293. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.

TRAJBER, R.; BRIANEZI, T.; BIASOLI, S. (Coords.). Diretrizes de educação ambiental climática. São Carlos, SP: Funbea, Instituto Clima e Sociedade e Cemaden, 2023. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/16PwYnoPo_s8zdp1KY3qCfguVeMi0H7xx/view?usp=sharing. Acesso em: 18 dez. 2024.

VÉLEZ, E. et al. *Nota explicativa. Desmatamento no bioma Pampa*. Relatório Anual do Desmatamento – RAD 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/05/nota-explicativa-desmatamento-pampa-v.31.05.2024.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

VIANA, B. F. et al. Benefícios mútuos entre agricultura, biodiversidade e serviços ecossistêmicos. PRADO, R. B. et al. (Orgs.). Relatório temático sobre agricultura, biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Plataforma brasileira de biodiversidade e serviços ecossistêmicos (bPbes). Campinas: ed. dos autores, 2024. p. 25-51. doi: <http://doi.org/10.4322/978-65-01-21502-0.cap01>.

WORLD BANK. Climate Change Knowledge Portal. for development Practitioners and Policy Makers. Disponível em: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/bra-zil/climate-data-projections>. acesso em: 04/11/2024.

Equipe de Trabalho

Rafael Cabral Cruz
Oceanólogo, mestre e doutor em Ecologia
Docente do Campus São Gabriel/UNIPAMPA

Igor Poletto
Engenheiro Florestal, mestre e doutor em Engenharia Florestal
Docente do Campus São Gabriel/UNIPAMPA

André Carlos Cruz Copetti
Agrônomo, mestre e doutor em Ciência do Solo
Docente do Campus São Gabriel/UNIPAMPA

Beatriz Stoll Moraes
Engenheira Química, especialista em Química aplicada ao Saneamento, mestre em Engenharia de Recursos Hídricos, doutora em Engenharia - ênfase em Tecnologias Ambientais.
Docente do Campus São Gabriel/UNIPAMPA.

Luciana Borba Benetti
Bióloga, mestre e doutora em Engenharia Ambiental.
Docente do Campus São Gabriel/UNIPAMPA.

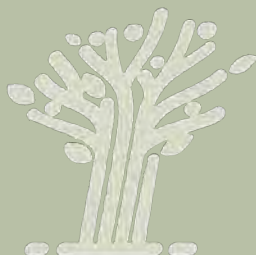
Wellington Bittencourt dos Santos
Biólogo, mestre em Ecologia e Biomonitoramento, doutor em Ensino História e Filosofia das Ciências.
Docente do Campus São Gabriel/UNIPAMPA.





Diretrizes do planejamento urbano e regional para uma transição sociotécnica resiliente na Região Hidrográfica do Guaíba

LUCIANA INÊS GOMES MIRON, INÊS MARTINA LERSCH
ANA ELÍSIA DA COSTA, BÁRBARA GIACCOM
CLARICE MISOCZKY DE OLIVEIRA
EUGENIA AUMOND KUHN, GEISA ZANINI RORATO
HELENIZA ÁVILA CAMPOS, JÚLIO CELSO BORELLO VARGAS,
HUMBERTO TEIXEIRA DAMILANO
ISABELLE CAROLINA MANGONI SOARES
NICOLE BUENO LEAL DE ALMEIDA, ANKITA SOOD



RESUMO

O capítulo propõe diretrizes para políticas públicas de planejamento urbano e regional, voltadas à transição sociotécnica para a resiliência climática e sustentabilidade dos espaços urbanos e regionais do Rio Grande do Sul, com foco na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG). Fundamentado nos conceitos de **resiliência**, teoria das **transições dos sistemas sociotécnicos** e **perspectiva multinível**, o estudo aborda o planejamento em um contexto de emergência climática. O conteúdo é estruturado em cinco seções: referencial teórico; análise de experiências nacionais e internacionais; caracterização da RHG e do desastre hidrológico de 2024; avaliação das limitações e potencialidades do planejamento urbano e regional; e diretrizes e ações, articulando categorias de sistemas sociotécnicos. As diretrizes destacam a relação sociedade-natureza e reforçam a necessidade de uma transição climática, ecológica e sociotécnica para reduzir riscos urbanos e promover um futuro resiliente e sustentável.





Mercado Público de Porto Alegre
com o primeiro pavimento alagado.

Inês Martina Lersch

Introdução

O presente capítulo visa propor diretrizes para subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas ao Planejamento Urbano e Regional, buscando uma transição sociotécnica para a resiliência climática e sustentabilidade dos espaços urbanos e regionais do Rio Grande do Sul, a partir do recorte espacial da Região Hidrográfica do Guaíba. O objetivo geral se desdobra nos seguintes objetivos específicos:

(i) identificar soluções referenciais nacionais e internacionais de experiências de enfrentamento a desastres hidrológicos

similares, entendendo que o processo de transição climática, ecológica e sociotécnica é necessário para minimizar os riscos urbanos; (ii) caracterizar o espaço urbano e regional da RHG, analisando suas condições de uso e ocupação do solo e seus conflitos com o meio natural, partindo do pressuposto de que a relação sociedade e natureza é sistêmica e complexa; (iii) analisar criticamente os principais instrumentos de planejamento urbano e regional em face às mudanças climáticas; (iv) realizar análise crítica do planejamento urbano e regional e das estruturas institucionais na resposta ao desastre climático.

O arcabouço teórico está fundamentado no conceito de **resiliência** (Holling, 1973; UNDRR, 2015), na teoria das **transições dos sistemas sociotécnicos** (Boni; Méndez; Ramirez, 2023) e na **perspectiva multinível – MLP** (Geels; Schot, 2007; Geels, 2010). Tais conceitos e abordagens são considerados em relação ao campo do planejamento urbano e regional em um contexto de emergência climática.

O trabalho se estrutura em cinco seções: (i) referencial teórico metodológico; (ii) levantamento e análise de experiências nacionais e internacionais; (iii) caracterização do espaço urbano e regional da RHG e dos efeitos do desastre hidrológico de 2024; (iv) análise das limitações e potencialidades do planejamento urbano e regional; e, por fim, (v) propostas de diretrizes e ações para uma transição sociotécnica por meio do planejamento urbano resiliente, como possibilidade de aplicação em todo o estado do RS.

1. Transição para espaços urbanos e regionais resilientes no atual regime climático

O conceito de resiliência ambiental, oriundo da ecologia, se refere à capacidade de um sistema recuperar seu equilíbrio após uma perturbação (Holling, 1973). A “resiliência” adotada como conceito-chave observa o Marco de Sendai para Redução de Riscos e Desastres, cuja finalidade é “prevenir a criação de novos riscos, reduzir o risco existente e aumentar a resiliência” (UNDRR, 2015).

Em contextos urbanos e regionais, a resiliência implica a superação de choques e tensões durante situações emergenciais de crise, não dependendo apenas da capacidade técnica dos setores públicos, mas também da interação entre atores sociais, políticos e econômicos envolvidos na sua manutenção. Cimellaro, Reinhorn e Bruneau (2010) destacam

quatro dimensões essenciais que devem ser aprimoradas no planejamento para a resiliência: rapidez, que se refere à capacidade de alcançar metas em tempo hábil para minimizar perdas; robustez, que trata da resistência a estresses sem perda de função original; redundância, que implica a existência de alternativas funcionais em caso de falhas; e desenvoltura, ou seja, a habilidade de identificar problemas e mobilizar recursos de maneira eficiente. Diante da crise climática, o planejamento para espaços urbanos e regionais resilientes demanda respostas adaptativas e mitigadoras para além das reações imediatas aos impactos, sendo necessária uma compreensão mais ampla, como a das transições sociotécnicas.

1.1. A transição de sistemas sociotécnicos

A teoria das transições sociotécnicas explica o ciclo adaptativo dos ecossistemas em busca de equilíbrio, orientando mudanças na interação entre sociedade e natureza. Para compreender como essas transições ocorrem, é necessário abordar o conceito de vida em um sentido mais amplo, incluindo toda matéria viva na crosta terrestre (Vernadskii, 1986). Entre essas formas de vida, destaca-se a humanidade, que habita espaços fixos ou transita entre eles.

Nos espaços fixos encontram-se as cidades e infraestruturas, cujo funcionamento depende de sistemas afetados pela crise climática. Segundo Boni, Méndez e Ramirez (2023), três sistemas principais moldam a ação humana:

- **Socioecológicos:** envolvem interconexões, relações de dependência entre os seres humanos e o meio ambiente;
- **Socioeconômicos:** tratam das transformações nos modos de produção, as relações de trabalho e sistemas culturais vinculados a espaços urbanos e regionais;



Inês Martina Lersch

Rua Caldas Júnior, esquina com a Rua dos Andradas em Porto Alegre.

- **Sociotécnicos:** abrangem meios e funções básicas para a sobrevivência e reprodução da sociedade.

Os sistemas sociotécnicos são compostos de diferentes categorias (Boni, Méndez e Ramirez, 2023):

- **Tecnologias:** infraestruturas, equipamentos e soluções técnicas que sustentam atividades essenciais;
- **Políticas e regulações:** leis e normas que regem o funcionamento e a evolução dos sistemas;
- **Mercado, atores e usuários:** empresas, organizações e indivíduos que interagem com os sistemas;

- **Discursos culturais:** valores, crenças e práticas sociais que influenciam o uso e aceitação dos sistemas;
- **Fontes de conhecimento:** pesquisas, inovações e competências que impulsionam o desenvolvimento e aprimoramento.

Esses sistemas são cruciais para os territórios humanos, garantindo atividades cotidianas e registrando a evolução histórica. A infraestrutura urbana e regional, como sistemas viários, saneamento, comunicação e informação, sustenta a reprodução da vida social. As transições dos sistemas sociotécnicos refletem interações complexas entre seres vivos e formas de produção do espaço, marcadas por eventos em diversas escalas, das locais às globais, que deixam marcas nos territórios.

O reconhecimento científico e político da emergência climática impõe o desafio de compreender esse processo, planejar um futuro menos agressivo ao planeta e à vida (Nobre, 2024). Nesse contexto, as transições dos sistemas sociotécnicos requerem transformações profundas nos modos de vida, na produção do espaço e na reprodução da sociedade, considerando diferentes níveis e contextos espaço-temporais.

A perspectiva multinível (MLP) oferece uma abordagem analítica estruturada em três dimensões interconectadas (Geels; Schot, 2007; Geels, 2010):

- **Panorama (Landscape):** refere-se ao contexto macro, abrangendo aspectos históricos, sociais e políticos que moldam a nossa realidade. Esse nível é influenciado por pressões de longo prazo, como mudanças ambientais e crises climáticas. Na conjuntura atual, Brenner e Schmid (2015) destacam o conceito da urbanização planetária, que



Praça da Alfândega, Centro Histórico da capital gaúcha.

impulsionada pela financeirização e pelo individualismo, vai além da expansão urbana tradicional. Esse processo abrange áreas não urbanizadas e setores como mobilidade, comunicação, logística e agronegócio, explorando intensamente os espaços naturais e acelerando impactos globais;

- **Regime:** configurações dominantes que englobam práticas, relações e discursos em dimensões políticas, institucionais e sociais. O Estado, o mercado e a sociedade articulam essas dinâmicas, priorizando frequentemente a mercantilização do trabalho e do meio ambiente. Infraestruturas e logísticas fortalecem a circulação

de mercadorias e capital, gerando desigualdades socioespaciais e conflitos;

- **Nichos:** espaços de práticas alternativas, promovidos por redes sociais, movimentos sociais, universidades e cooperativas, que buscam modos de vida mais sustentáveis. Esses nichos desafiam frequentemente o regime dominante, necessitando superar barreiras regulatórias e estruturas globais estabelecidas para efetivar a transição sociotécnica.

As interações entre essas dimensões são dinâmicas. A transição sociotécnica sustentável ocorre quando práticas inovadoras originadas

nos nichos desafiam o regime vigente, resultando na formação de novos regimes mais alinhados aos princípios da sustentabilidade. Esse processo, complexo e conflituoso, reflete os desafios impostos pelo sistema capitalista e os interesses econômicos, políticos e culturais em jogo (Geels, 2002).

1.2. Medidas não estruturais e estruturais na transição para espaços urbanos e regionais resilientes

A resiliência urbana e regional a partir da transição sociotécnica necessita ser pensada a médio e longo prazos, envolvendo um planejamento sistemático que monitore os limites e possibilidades dos territórios, baseado em fontes científicas e qualificação continuada de seu corpo técnico, para responder adequadamente aos desastres. Para tanto, é necessário definir recursos (financeiros, humanos e tecnológicos) e estabelecer quais medidas são necessárias e suficientes. Jha, Bloch e Lamond (2012) definem que essas medidas podem ser não estruturais e estruturais. As medidas não estruturais dizem respeito a ações voltadas para mudanças de concepções e comportamentos da sociedade e de seus atores em relação ao planejamento e gestão dos territórios, bem como à cultura e ao conhecimento (UNDRR, 2015). As medidas estruturais, por sua vez, envolvem construções físicas projetadas para reduzir ou evitar impactos de perigos, abrangendo técnicas e tecnologias de engenharia que fortalecem estruturas ou sistemas, aumentando sua resistência e resiliência.

A integração de medidas não estruturais e estruturais, segundo publicações de Jha, Bloch e Lamond, (2012) e UNDRR (2015), é fundamental para a resiliência das cidades a inundações, pois isoladamente essas medidas não são suficientes. A construção de diques e

de bacias de amortecimento, descanalização e renaturalização de rios, por exemplo, são medidas estruturais importantes e necessárias, mas mesmo essas não estão livres de falhas, como ocorreu com os diques de Porto Alegre, em 2024, e de Nova Orleans, em 2005. Além disso, essas obras envolvem altos recursos e podem gerar impactos ambientais no seu entorno ou em outras regiões. Assim, em paralelo, é necessário também mobilizar diferentes grupos sociais (políticos, técnicos, empresários, comunidades etc.) para, a curto e médio prazo, analisarem as suas vulnerabilidades e agirem diante de desastres, e a longo prazo, construírem novas relações com a cidade e a natureza por meio da integração de medidas não estruturais e estruturais. Neste capítulo serão enfatizadas as medidas não estruturais, pertinentes ao campo do planejamento urbano e regional.

2. Experiências como fonte de conhecimento

Diante dos desastres climáticos, experiências de planejamento e gestão de diversas partes do mundo procuram integrar medidas não estruturais e medidas estruturais. São experiências que não obedecem a modelos, já que as características ambientais, sociais e políticas de cada contexto moldam suas próprias vulnerabilidades e capacidades de adaptação (Olazabal *et al.*, 2024). De qualquer forma, pode-se aprender com algumas dessas experiências que envolvem estratégias de planejamentos em diferentes escalas e com a atuação de distintos atores.

2.1. Planejamento regional

Uma das medidas não estruturais, que envolve mudanças de comportamento principalmente de políticos e técnicos, é promover uma abordagem regional dos territórios, ou seja,

para além dos limites político-administrativos predefinidos, já que problemas ambientais transcendem esses limites. Assim, é necessário pensar em modelos de gestão do território não só centrados nas municipalidades, como determina a Constituição Federal (1988) e o Estatuto da Cidade (2001), mas que também incentivem planejamentos metropolitanos e regionais. Nesse contexto, têm sido relevantes o planejamento e a gestão que integram cidades de uma mesma bacia hidrográfica. No **Brasil**, o Rio Grande do Sul foi pioneiro na adoção desse modelo, criando os Comitês das Bacias Sinos e Gravataí e incluindo o Sistema Estadual de Recursos Hídricos na Constituição Estadual (Rio Grande do Sul, 1989) que adotou a bacia hidrográfica como unidade de gestão dos recursos hídricos.

Na ausência dessas estruturas de planejamento ou complementares a elas, uma alternativa aos municípios tem sido a atuação em consórcios públicos dedicados a ações de prevenção e contingência de desastres. No **Brasil**, os municípios da região serrana do Rio de Janeiro, após a catástrofe de 2011, estabeleceram um convênio de apoio mútuo. Experiências similares aos consórcios são também observadas nos **Estados Unidos**, como ilustra a articulação de nove municípios do condado de Black Hawk (Iowa) que, frente aos desafios dos alagamentos do Rio Cedar, desenvolveram um Plano de Mitigação de Riscos comum. Entre os municípios envolvidos está o de Cedar Falls, que será discutido posteriormente (APA, n.d). Apesar de não substituir um planejamento urbano e regional consistente, os consórcios ampliam as capacidades financeiras e operacionais dos municípios frente aos desafios ambientais, bem como seus poderes de negociação junto às esferas estadual e federal (Saito *et al.*, 2021).

2.2. Planejamento municipal

Outra mudança de comportamento necessária é a proposição de planos urbanísticos considerando os recursos naturais. As propostas podem envolver novos zoneamentos de usos em áreas de risco, considerando adaptações, tais como, redução de índices construtivos, emprego de novas tipologias de construção, análise da necessidade de realocações urbanas em casos críticos e enfrentamento das situações de vulnerabilidade socioambiental.



Equipe de planejamento do Vilarejo de Shibitachi, Japão, atingido por tsunami em 2011.

Esforços nesse sentido, associados a medidas estruturais, são observados no referido caso de **Cedar Falls, Estados Unidos**. Grande parte da cidade está sobre uma planície de inundação, sofrendo com episódios recorrentes, especialmente a partir dos anos 1990. Desde então, foram investidas medidas estruturais, como manutenção e construção de diques, instalação de "bexiga de inundação" que pode ser inflada e removida após uma enchente, e ainda construção de bacias de amortecimento. Em paralelo, medidas não estruturais ligadas ao planejamento foram adotadas, tais como: a revisão do mapa da planície de inundação da cidade, incluindo cotas de alagamento previstas para o futuro, o que redefiniu as zonas de risco da cidade. Nessas, o zoneamento ou uso do solo foi alterado, proibindo ou limitando novas ocupações, loteamentos e equipamentos (hospitais, escolas e casas de idosos etc.). A longo prazo e por meio de um programa federal, vêm sendo comprados imóveis sujeitos à inundação, sendo esses removidos, mantidos em desuso, ou usados como áreas verdes para a ampliação da drenagem natural urbana (APA, n.d).

O caso do **Vilarejo de Shibitachi, Japão**, apesar de em menor escala, também ilustra medidas estruturais e não estruturais similares. Esse é um pequeno vilarejo de pescadores localizado em uma península suscetível a terremotos e tsunamis, no qual se destaca o impacto causado pelo grande terremoto de Tohoku, em 2011. Após esse episódio, medidas estruturais foram adotadas, como a construção de uma barreira contra tsunamis. Em paralelo, o planejamento urbano previu um zoneamento em que moradias foram realocadas em uma zona segura e somente usos recreativos e pesqueiros foram permitidos nas áreas inundáveis próximas à orla.

Atravessa esses planos o desafio político-ético de reduzir condições de vulnerabilidade socioambiental, já que essa é a causa raiz da

suscetibilidade aos impactos de catástrofes ambientais e/ou da falta de condições para reagir a eles (Mohinuddin, 2020). Nesse contexto, considera-se como contraexemplo o caso de **Nova Orleans, Estados Unidos**, apesar de ser recorrentemente tomado como um caso de sucesso. Situada entre o Rio Mississippi e o Lago Pontchartrain, os sistemas de diques da cidade não resistiram aos impactos do furacão Katrina em 2005 (Plyer, 2015), afetando principalmente áreas baixas, onde se concentrava a população socialmente mais vulnerável. Após o evento, os investimentos se concentraram em áreas privilegiadas e de interesse imobiliário (Avelar, 2007). A população mais afetada foi então impelida a se transferir para outras áreas: pela imposição de remoções, pela falta de habitações e de serviços, e por falta de financiamentos para a construção de novas casas. Deslocadas e sem assistência, essas comunidades vulneráveis tendem a reproduzir problemas em outras áreas, acarretando novos desafios socioambientais.

No **Brasil**, a redução de riscos envolvendo o efetivo enfrentamento de desigualdades socioespaciais passou a ser estimulada com o programa federal "Periferia Sem Risco"¹, do Ministério das Cidades. O programa apoia o desenvolvimento de Planos Municipais de Redução de Risco, em cooperação com universidades, e Planos Comunitários de Gestão de Riscos (Brasil, 2024b). Em geral, esses planos propõem, além das "infraestruturas construídas", também processos de melhorias sociais.

2.3. Planejamento comunitário

Ainda tratando de mudanças de comportamentos, diversas iniciativas de planejamento e gestão buscam promover uma profunda participação e ativação social. Espera-se, com isso, oportunizar reflexões

coletivas sobre vulnerabilidades e atribuir responsabilidades ligadas às ações de prevenção, socorro e recuperação. Planos dessa natureza devem ser baseados em valores locais, suas experiências do passado e imaginários de futuro (Olazabal *et al.*, 2024). Exemplo desse tipo de planejamento são os “Mapeamentos Coletivos de Riscos”, desenvolvidos na cidade de **Cartagena, Chile**. Nessa experiência, foram organizadas entrevistas e workshops para que agentes locais, moradores e técnicos coproduzissem mapas de riscos sobre seus territórios. Esses, por sua vez, orientaram decisões compartilhadas sobre conflitos, intervenções mitigadoras de risco e estratégias de resiliência (Visconti *et al.*, 2021).

O exemplo de **Cedar Falls** com os “Planos Comunitários de Gestão de Riscos” também merece atenção: após o incentivo à participação social já na redefinição do plano urbanístico geral da cidade, planos comunitários de bairros foram desenvolvidos com o slogan “construindo uma comunidade maior para os filhos dos nossos filhos”. O reconhecimento de vulnerabilidades e a construção de estratégias futuras se deu ao longo de quatro meses e em oito reuniões (Schwab, 2014). Em todas essas instâncias, uma universidade local teve papel fundamental, ao produzir conhecimentos sobre o tema e desenvolver ações de educação.

No caso do **Vilarejo de Shibitachi**, um planejamento comunitário envolveu moradores organizados em uma associação para pensar seu território para os próximos 100 anos. Em oficinas e debates, buscou-se construir laços de confiança, identificar anseios e problemas e propor estratégias de reconstrução. Contando com o apoio da Universidade de Tóquio e de outras universidades do país, foram desenvolvidas atividades educativas, tais como: mapeamentos simbólicos da paisagem pré e pós-desastre e uso de maquetes para planejar

áreas de reassentamento e rotas de fuga (Jalowitzki, 2021).

No **Brasil**, planos comunitários de gestão de riscos vêm sendo desenvolvidos em diversas modalidades, especialmente por iniciativas universitárias e de instituições que se dedicam a comunidades em vulnerabilidade. Entre algumas ações pontuais, destaca-se o plano Trilhas para Comunidades Mais Seguras: Construindo Planos Comunitários de Gestão de Riscos e Emergências, realizado pela Cáritas de Minas Gerais, junto às comunidades de Porteirinha e Jampruca de Belo Horizonte (Arcangelo; Valverde, 2023). Em ações mais amplas, pode-se citar o Plano Comunitário de Defesa Civil e Adaptação à Crise Climática da comunidade caiçara de Ponta Negra (RJ), desenvolvido pelo Instituto Pólis em parceria com o Conselho de Arquitetura e Urbanismo (CAUBR). Oficinas participativas organizadas em três etapas levaram a um Plano Comunitário de Defesa Civil, com indicação de vulnerabilidades indutoras de risco e de medidas de defesa; e a um Plano de Adaptação à Crise Climática, com diretrizes para reordenamento físico, saneamento e acesso à energia (Instituto Pólis, n.d). No conjunto, tais experiências têm o potencial de aumentar a eficiência das medidas de prevenção e das ações de proteção de pessoas e bens. Além disso, também oportunizam processos de reflexão e mudanças de comportamentos individuais e coletivos, o que é fundamental para uma transição sociotécnica.

3. Espaço urbano e regional e o desastre de 2024 na Região Hidrográfica do Guaíba

A RHG é formada por nove bacias: do Alto Jacuí, do Baixo Jacuí, do Caí, do Gravataí, do Lago Guaíba, do Pardo, do Sinos, do Taquari/Antas e Vacacaí-Vacacaí Mirim; com 252 municípios total ou parcialmente inseridos na Região



Inês Martina Lersch

Prefeitura Municipal de Porto Alegre alagada.

Hidrográfica (Rio Grande do Sul, 2024c). Os municípios da RHG são majoritariamente de pequeno porte populacional, com 70% deles com menos de 20 mil habitantes (IBGE, 2024). A RHG abriga as Regiões Metropolitanas de Porto Alegre e da Serra Gaúcha, além de cidades estratégicas dos vales dos Rios Taquari, Antas, Caí e Jacuí, concentrando os principais polos urbanos e infraestruturas fundamentais para a integração e o desenvolvimento socioeconômico do RS. Essa ampla rede sociotécnica sustenta fluxos logísticos regionais e nacionais, conectando parte das cadeias produtivas do estado aos circuitos globais de

comércio e investimento. Em 2023, essa rede foi responsável por 70,6% do Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* do estado (R\$ 55.454,00), abrangendo cerca de 1,22 milhão de CNPJs cadastrados na Secretaria da Fazenda do RS (79%). O Valor Adicionado Bruto (VAB) distribuiu-se em aproximadamente 9% da Agropecuária, 27% da Indústria, 51% dos Serviços e 13% da Administração, Defesa, Educação, Saúde Pública e Seguridade Social (IBGE, 2023).

Esse potencial econômico convive com uma marcante exposição a eventos hidrológicos extremos, pois as cidades e infraestruturas críticas distribuem-se majoritariamente próximas a corpos d'água, várzeas, áreas alagadiças e relevos acidentados. Na RHG todos os municípios têm áreas urbanizadas junto a rios ou lagos, evidenciando os conflitos entre o uso e ocupação do solo e o meio ambiente. De forma simplificada, pode-se dizer que as Bacias do Taquari-Antas, Caí, Sinos, Pardo, Alto e Baixo Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim têm como característica um relevo acidentado e rios com correntes, mais propensas a enxurradas e movimentos de massa. A Bacia do Guaíba, por sua vez, é basicamente uma planície com largas áreas de extravasamento e, portanto, altamente propensa a inundações e alagamentos.

A elevada vulnerabilidade das estruturas antrópicas, resultante da incompatibilidade entre a localização e a configuração da rede urbana e as dinâmicas naturais das bacias hidrográficas, foi reconhecida desde as enchentes de 1941 e 1963. Em resposta, projetou-se um amplo sistema de proteção formado por diques e bombas, abrangendo municípios da RMPA como Porto Alegre, Canoas, São Leopoldo e Novo Hamburgo. No entanto, essa medida estrutural, baseada em tecnologias construtivas pesadas e de alta complexidade, não se mostrou adequada nem suficiente em 2024, condição agravada pela falta de

manutenção dos equipamentos e de controle da urbanização dos diques, especialmente na capital.

Projetos de recuperação e expansão do sistema têm sido anunciados, porém, o cenário ainda apresenta riscos significativos à segurança de milhões de pessoas, devido ao aumento da frequência e intensidade das chuvas, que ameaçam a integridade de infraestrutura essenciais. A interrupção de serviços fundamentais como mobilidade, saneamento, energia, abastecimento e comunicações é um dos riscos para o pleno funcionamento das atividades urbanas e regionais.

A Figura 1 sobrepõe a rede urbana ao substrato geo-hidrológico da RHG, evidenciando a interação (desarmônica) entre o meio físico, a urbanização e os elementos críticos de infraestrutura, especialmente as malhas viárias (rodovias e ferrovias), aeroportos e portos.

O evento hidrológico enfrentado no estado foi causado por chuvas intensas e prolongadas, resultando em enchentes devastadoras e inúmeros movimentos de massa (Inpe, 2024). Reiterando o estado de calamidade pública já vivenciado em 2023, o Decreto nº 57.646, de maio de 2024, classificou o evento como desastre natural meteorológico de tempestades sem precedentes. Dos 497 municípios do estado, 95 estavam em estado de calamidade pública (19%) e 357 em estado de emergência (72%). Na RHG, dos 252 municípios, 85 estavam em calamidade pública (33%) e 153 em estado de emergência (60%) (DEE/Deplan/SPGG, 2024). Em perdas humanas, o evento resultou em 183 mortes confirmadas e 27 pessoas desaparecidas, segundo balanço publicado em agosto de 2024 (Defesa Civil/RS, 2024). Collischonn *et al.* (2025) explicam que as inundações ao longo dos principais rios afetaram uma

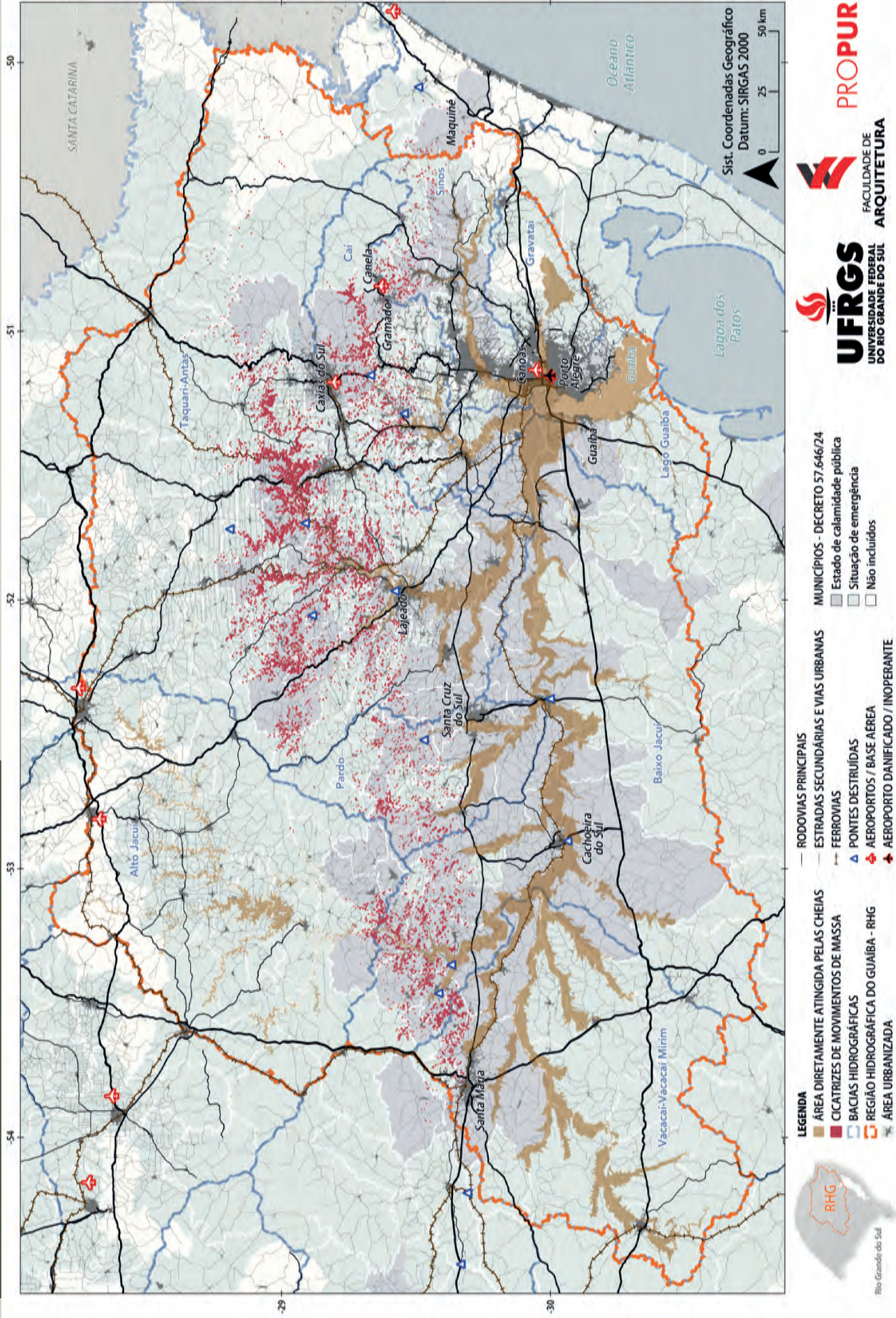
área de cerca de 15.000 km², com população estimada em 850.000 pessoas, sendo que mais da metade das pessoas deslocadas viviam em áreas da RMPA que deveriam ter sido protegidas pelo sistema de defesa contra inundações.

A **robustez** de redes e equipamentos mostrou-se limitada, com sistemas como a proteção contra inundações falhando em áreas críticas, causando perdas humanas e materiais significativos. Houve pouca **rapidez** na recuperação, com grandes atrasos na reestruturação dos serviços essenciais, afetando transporte, abastecimento de água e energia, evidenciada pelos seis meses necessários para reabrir o Aeroporto Salgado Filho e o fechamento prolongado de rodovias e pontes. Essa demora agravou o impacto em serviços essenciais como saúde e educação, bem como a reintegração das famílias atingidas, prolongado o tempo de permanência em abrigos. A Tabela 1 apresenta o número de equipamentos atingidos por segmento, sendo os equipamentos de desenvolvimento social (Centro de Referência de Assistência Social, Centro POP e Centro Dia 1) e saúde, os mais atingidos em um momento de altíssima demanda desses serviços.

Tabela 1. Equipamentos atingidos pela inundação do Rio Grande do Sul			
Equipamentos	Total	Atingidos	%
Educação	9.999	782	7,8
Saúde	3.301	243	11
Desenvolvimento	762	69	13,7
Segurança	707	42	5,9
Cultura	1.009	111	11
	Malha Viária Total (km)	Malha Viária Atingida (km)	%
	241.449	11.572	4,8

Fonte: elaboração própria a partir de Iede (2024)

Figura 1. Rede urbana e substrato geo-hidrológico da RHG.



Com a falta de redundância, a crise foi agravada, evidenciando a ausência de estruturas de backup, como válvulas de refluxo em estações de bombeamento e rotas alternativas para as vias interrompidas, ampliando os impactos, uma vez que a falha de um único componente levou a interrupções em cascata. Embora a funcionalidade já tenha sido retomada na maioria dos setores no momento deste estudo (dezembro de 2024), a falta de estruturas adaptativas e caminhos alternativos impediu respostas mais eficazes, ampliando os custos humanos e econômicos do desastre.

4. Instrumentos de planejamento e estruturas institucionais

A intensificação dos eventos climáticos extremos exige adaptações dos instrumentos de planejamento urbano e regional, bem como das estruturas institucionais responsáveis pela gestão do território. A seção 4.1 analisará criticamente os principais instrumentos de planejamento adotados no Rio Grande do Sul e a eficácia de suas políticas frente aos desafios climáticos nas diferentes escalas de planejamento. Na seção 4.2 discute-se o papel das estruturas institucionais na resposta a desastres climáticos.

4.1. Instrumentos de planejamento urbano e regional em face às mudanças climáticas

Os instrumentos normativos têm papel importante na transição para a sustentabilidade, uma vez que leis e planos possuem a capacidade de direcionar, frear ou acelerar iniciativas que influenciam os processos sociotécnicos de transição (Soininen *et al.*, 2021). Sem esse suporte, é difícil alinhar ações do poder público e de diferentes agentes/atores para ocorrerem com a rapidez suficiente

para a transição com vistas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

No que se refere ao âmbito estadual, o RS foi um dos pioneiros ao aprovar a Política Gaúcha sobre Mudanças Climáticas (PGMC) em 2010, um ano após a Política Nacional sobre Mudança do Clima, a qual reconhece o papel e estabelece diretrizes voltadas ao planejamento urbano e regional. Como toda política, a PGMC carece de maior detalhamento e, em sua aprovação, previa a elaboração de planos específicos. No entanto, observa-se que somente em 2023 e 2024, anos marcados por inundações históricas no estado, foram lançados, respectivamente, os planos Proclima 2050: Estratégias para o Enfrentamento das Mudanças Climáticas (Rio Grande do Sul, 2023) e Plano Rio Grande: Programa de Reconstrução, Adaptação e Resiliência Climática do Estado do RS (Rio Grande do Sul, 2024a). Ambos os documentos apresentam estratégias ou projetos estruturantes voltados às áreas urbanas, sendo que o primeiro apresenta as estratégias mais genéricas para o conjunto de municípios, enquanto o segundo, por responder aos problemas já ocorridos, apresenta propostas mais específicas para algumas cidades ou conjunto de cidades. Apesar de cada um dos documentos dar resposta a situações emergenciais distintas, a existência de dois planos que abordam a mesma temática demonstra uma aparente falta de articulação entre as iniciativas do estado. Além disso, a existência de dois sites governamentais paralelos, com inúmeros links e documentos auxiliares para apresentação das ações, dificulta a compreensão da sociedade civil acerca da articulação das propostas e impossibilita o monitoramento sistemático do andamento das ações.

No âmbito regional ou supramunicipal, não foram identificadas políticas ou planos

multissetoriais diretamente relacionados ao planejamento urbano e regional. A articulação entre os entes federativos e entre políticas setoriais é um desafio amplamente reconhecido no planejamento urbano e regional brasileiro, dado o esforço necessário para superar a abordagem fragmentada da dimensão territorial no país (Krause, 2024). Embora o ProClima estabeleça a necessidade de uma estrutura de governança multinível, não foram encontradas, no site do Governo do Estado ou em documentos complementares, informações detalhadas sobre como essa estrutura será implementada, de modo que o plano ainda não avança em apresentar soluções concretas para

sua implementação. No que se refere às regiões metropolitanas (RMs) e aglomerações urbanas (AUs), o Estatuto da Metrópole (Brasil, 2015) estabelece que essas regiões devem contar com um plano de desenvolvimento urbano integrado (PDUI), aprovado mediante lei estadual. Além disso, os municípios por elas englobados devem compatibilizar seus PDs com o PDUI. Observa-se, no entanto, que no RS nenhuma das RMs e AUs elaboraram seus PDUIs.

No âmbito municipal, verificou-se que, no RS, ainda são poucos os instrumentos de planejamento que abordam as mudanças climáticas, tanto em planos ou leis específicas sobre o tema, quanto

Bairro Cidade Baixa, em Porto Alegre,
alagado pela enchente de 2024.



em seus planos diretores, principal instrumento da política de desenvolvimento e expansão urbana (Brasil, 1988).

Em se tratando das políticas e planos específicos sobre mudanças climáticas, foi possível encontrar tais instrumentos em, apenas, três municípios² do estado. Destaca-se Porto Alegre, por possuir uma política aprovada específica sobre mudanças climáticas (Porto Alegre, 2020) e dispor de uma Estratégia de Resiliência (Porto Alegre, 2016) e de um Plano de Ação Climática (Plac) (Porto Alegre, 2024). O segundo apresenta um número muito maior de ações para mitigação e adaptação às mudanças climáticas do que o primeiro. Entretanto, poucas ações apresentam algum grau de espacialização. Já o Plano Diretor de Porto Alegre em vigor (Porto Alegre, 2010) nem mesmo aborda o tema das mudanças climáticas.

A análise dos PDs dos 34 municípios da RMPA aponta que apenas quatro³ possuem PDs que referenciam diretamente o termo mudanças climáticas, e o fazem em seções que tratam da temática do meio ambiente ou da defesa civil. No entanto, o citam de forma genérica e não apresentam aplicações concretas na organização territorial dos municípios. Além disso, nenhum PD cita a necessidade de articulação supramunicipal. Esses resultados confirmam estudos que analisaram outros PDs no Brasil (Espíndola; Ribeiro, 2020; Carvalho *et al.*, 2019). Segundo as pesquisas, poucos PDs mencionam as mudanças climáticas e, entre eles, a maioria carece de propostas claras.

A análise dos municípios do Vale do Taquari, afetados pelos desastres, tanto de 2023, quanto de 2024, demonstra que seis⁴ nem mesmo possuem PDs aprovados, refletindo uma fragilidade ainda maior desses municípios. Nessa região, muitos municípios não tinham, até então, obrigatoriedade de elaborar o PD, devido

ao porte ou à ausência de enquadramento no Estatuto da Cidade. Além disso, não há exigência legal para compatibilizar seu planejamento em escala regional, como ocorre em regiões metropolitanas. Considerando os municípios mais afetados do Vale do Taquari, nenhum dos que contam com PDs aborda o tema das mudanças climáticas. Reforçando a importância do planejamento urbano, o Plano Rio Grande prevê um projeto estruturante que envolve a elaboração ou revisão de PDs para os municípios mais afetados na região.

No que diz respeito às escalas de gestão do território, o ordenamento jurídico brasileiro atribui aos municípios a responsabilidade de legislar sobre assuntos locais e executar a política de desenvolvimento urbano (Brasil, 1988; Brasil, 2001). Entretanto, esses marcos legais apresentam lacunas acerca das relações interfederativas e do compartilhamento de competências para a gestão urbana, principalmente quando se trata de temas que perpassam os limites municipais, como os relacionados às mudanças climáticas. Apenas marcos legais posteriores, como a Lei dos Consórcios (Brasil, 2008) e o Estatuto da Metrópole (Brasil, 2015), avançaram ao trazer instrumentos que promovam a articulação interfederativa. Nesse sentido, conclui-se que os instrumentos analisados neste capítulo mostram limitações no que se refere ao planejamento multiescalar do território gaúcho, ao não avançar sobre o tema em instrumentos de planejamento urbano na escala regional. Um exemplo é a inexistência de PDUIs no estado, os quais são apontados como instrumentos que poderiam promover a articulação intermunicipal (Costa *et al.*, 2024).

A partir dos instrumentos analisados, é possível constatar também que o tema das mudanças climáticas tem sido abordado como uma política setorial, independente das políticas urbana e



Rua General Câmara esquina
Rua dos Andradas em Porto Alegre.

ambiental, visto que as leis e instrumentos que tratam desses três temas desenvolveram-se em paralelo, com pouca articulação explícita. Essa constatação parece perpetuar uma limitação histórica do planejamento territorial no Brasil, onde as políticas urbana e ambiental se desenvolveram a partir de marcos legais e conceituais distintos (Emiliano, 2015; Costa *et al.*, 2012; Costa, 2008).

No contexto jurídico brasileiro, o PD é o instrumento que mais facilmente aproxima os desafios das políticas urbana, ambiental e das mudanças climáticas. No entanto, Araújo

(2021) observa que dispositivos voltados às mudanças climáticas, como soluções baseadas na natureza, incentivo à mobilidade ativa e à transição agroecológica, continuam amplamente ausentes dos PDs no Brasil. Além disso, aponta-se a necessidade de se pensar novos instrumentos ou de repensar os instrumentos do Estatuto da Cidade à luz da dimensão integradora das questões ambientais (Araújo, 2021; Araújo; Campante; Pinheiro, 2024).

4.2. O planejamento e a gestão do espaço urbano e regional na resposta ao desastre

O evento climático extremo evidenciou a fragilidade de capacidade estatal e articulação política no planejamento urbano e regional. Ações e posicionamentos político-institucionais ao longo dos últimos anos contribuem para a consolidação desse panorama. No âmbito federal, o Ministério das Cidades foi extinto em 2018 e retomado em 2024, com a função de regulamentar áreas suscetíveis a desastres naturais (Brasil, 2001; IBDU, 2018). Em 2016, o Governo do RS extinguiu várias fundações, incluindo a Metroplan, responsável por estudos e projetos de infraestrutura e proteção contra inundações. Em 2019, a extinção foi revertida devido à importância da fundação para convênios federais (Cademartori, 2019). Em entrevista com servidor da Secretaria de Desenvolvimento Urbano Metropolitano (Sedur), identificou-se que no Vale do Taquari os municípios enfrentaram dificuldades para acessar recursos federais devido à falta de estudos técnicos e estrutura administrativa, uma fragilidade diagnosticada após o desastre de 2023.

Ao nível municipal, os planos diretores, sua estrutura e revisões demonstram outra face da fragilidade das políticas urbanas. Destaca-se o exemplo de Porto Alegre, cuja revisão do plano diretor, que deveria ser feita a cada 10 anos, está

atrasada há uma década, com a contratação de cargos comissionados e consultoria internacional (Oliveira; Nicolini, 2023). Essas revisões tardias e prolongadas comprometem a atualização das políticas urbanísticas e dificultam a implementação de medidas contra os desafios climáticos. A extinção e falta de renovação das instâncias estaduais de planejamento, somada à flexibilização das regras de uso do solo, gera instabilidade institucional, enfraquecendo setores capazes de planejar e administrar os territórios de forma sustentável.

Em resposta ao desastre de 2024, foi criada a Secretaria Extraordinária da Presidência da República para Apoio à Reconstrução do Rio Grande do Sul (Sers), promovendo a articulação entre os governos e a sociedade civil (Brasil, 2024d). O Governo do RS, por sua vez, criou a Secretaria da Reconstrução Gaúcha (Serg) e implementou o Plano Rio Grande, com ações emergenciais e de longo prazo para reconstrução e resiliência climática, como proteção contra inundações e melhorias em infraestrutura e saneamento (Rio Grande do Sul, 2024a). A Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES) tem colaborado na revisão de planos diretores e mapeamentos regionais (Rio Grande do Sul, 2024b). As universidades tem desempenhado um papel central na produção de conhecimento crítico após o desastre hidrológico (Ferreira, 2024).

Ressaltam-se, enquanto estrutura de planejamento urbano e regional, as ações relacionadas à participação popular, essencial para garantir que as ações políticas atendam às necessidades da população, vislumbrando uma construção de cidades e soluções mais justas. A participação dos diferentes grupos sociais ocorre por meio de conselhos, conforme estabelecido no art. 204, inciso II, da Constituição Federal de 1988, que garante

a participação da população na formulação das políticas e no controle das ações em todos os níveis, especialmente em conselhos de caráter deliberativo e participativo (Brasil, 1988). No contexto da crise climática, o Grupo de Trabalho Especial de Acompanhamento das Ações de Reconstrução foi criado no Conselho das Cidades (Brasil, 2024a). O Conselho do Plano Rio Grande, com 179 conselheiros, carece de diversidade, com predominância de representantes empresariais e baixa representatividade de movimentos sociais, sindicatos e entidades ambientais (Rio Grande do Sul, 2024a).

Apesar da baixa representatividade popular, há uma centralização das demandas em questões habitacionais, com movimentos populares, como o Movimento dos Trabalhadores Sem Teto (MTST) e o Movimento de Luta nos Bairros, Vilas e Favelas (MLB), pressionando por soluções de moradia pós-desastre no Vale do Taquari e na RMPA (*Correio do Povo*, 2024; Aguiar, 2024; Faleiro, 2024). Esses movimentos demonstram resistência aos poderes hegemônicos e propõem alternativas para enfrentar as crises.

A falta de preparo e a dificuldade em mobilizar recursos de maneira eficaz agravaram a situação, evidenciando a insuficiência das ações improvisadas e a urgência de aprimorar a resposta aos desastres. A priorização pela eficiência operacional e pelas medidas estruturais, em detrimento de medidas não estruturais que efetivamente possibilitem uma transição sociotécnica em prol de espaços urbanos e regionais resilientes, compromete a capacidade de enfrentar crises. Esse modelo insustentável exige uma revisão das políticas públicas voltadas ao Planejamento Urbano e Regional diante da intensificação global de eventos climáticos extremos.



Avenida Getúlio Vargas, no bairro Menino Deus, em Porto Alegre, tomada pelas águas.

5. Diretrizes para uma transição sociotécnica

A enchente de 2024 no Rio Grande do Sul expôs fragilidades no enfrentamento de desastres, destacando a necessidade de repensar os instrumentos, estruturas e estratégias de planejamento urbano e regional e, por meio deles, o modelo de desenvolvimento do estado. Embora seja difícil estar completamente preparado para eventos da magnitude dos que ocorreram em 2024, observou-se que o estado do RS e a RHG poderiam ter sido menos impactados se dispusessem de mecanismos de planejamento mais bem estruturados para

a resiliência climática e a sustentabilidade dos espaços urbanos e regionais. O planejamento nas escalas urbana e regional é essencial para integrar conhecimento técnico e sensibilidade social, organizando o território e mitigando futuros impactos. Assim, a adoção de diretrizes não estruturais representa uma estratégia importante para alcançar uma transição sociotécnica por meio de políticas públicas voltadas ao planejamento urbano e regional. Tais diretrizes poderão equilibrar ações de curto, médio e longo prazos, bem como orientar a priorização de medidas estruturais e a destinação de recursos. As diretrizes propostas neste capítulo foram elaboradas de forma a articular a perspectiva multinível

(panorama, regime e nichos) com as categorias de sistemas sociotécnicos (tecnologia; políticas e regulações; mercado, atores e usuários; discursos culturais e fontes de conhecimento). A seguir, são apresentadas as cinco diretrizes com exemplificação de ações que poderiam ser adotadas para o fortalecimento da capacidade do estado frente aos desafios climáticos e sociais.

5.1. Reconhecimento da emergência climática como política de Estado e como fator de alto risco à sociedade

O reconhecimento da emergência climática está relacionada à dimensão **panorama** e ressalta a necessidade de transformação por meio de ações que articulem algumas das categorias dos sistemas sociotécnicos, tais como: políticas e regulações; mercado, atores e usuários e discursos culturais. Essa diretriz é fundamental para garantir a continuidade do planejamento, com alocação orçamentária adequada para enfrentar os riscos impostos pelas mudanças climáticas, além de ações integradas e coordenadas, voltadas para o fortalecimento das instituições e comunidades:

- **Consolidação de autoridades metropolitanas:** criar e fortalecer entes supramunicipais para coordenar a gestão territorial e integrar os municípios, especialmente nas áreas metropolitanas, promovendo planejamento e resposta eficiente aos desastres;
- **Capacitação técnica e comunitária:** investir na formação de técnicos municipais e lideranças comunitárias para aumentar a eficiência das ações climáticas locais e envolver diretamente a população;
- **Coordenação e avaliação das ações climáticas:** criar uma Secretaria da Emergência Climática para coordenar



Inês Martina Lersch

Casa de Cultura Mário Quintana, em Porto Alegre, durante enchente de 2024.

ações intersetoriais e interfederativas no enfrentamento das mudanças climáticas, garantindo a implementação e avaliação periódica do Plano Rio Grande;

- **Alinhamento aos compromissos internacionais climáticos:** integrar o Rio Grande do Sul a compromissos globais para

melhorar o acesso a tecnologias e recursos para mitigação das mudanças climáticas;

- **Nova revisão do Código Ambiental Estadual:** verificar nas versões atual e anterior as melhores regulamentações para combater desastres e riscos;
- **Visão biocêntrica e direitos da Natureza:** promover a ética biocêntrica e reconhecer a Natureza como detentora de direitos em políticas públicas e legislação ambiental.

5.2. Retomada de políticas e estratégias regionais, com maior atenção àquelas com base na natureza

A retomada de políticas e estratégias regionais, com ênfase na dimensão **regime** e na articulação das cinco categorias dos sistemas sociotécnicos, busca fortalecer a governança territorial. Essas iniciativas, fundamentadas em soluções baseadas na natureza, têm como objetivos promover a sustentabilidade, reduzir desigualdades e garantir uma adaptação eficaz e integrada aos desafios climáticos e sociais da região.

- **Monitoramento climático regional:** implantar estações meteorológicas interconectadas para prever eventos extremos e planejar respostas adequadas;
- **Gestão de áreas de risco:** mapear e monitorar áreas vulneráveis a inundações, com sistemas de alerta e protocolos de segurança;
- **Controle de inundações:** modernizar os sistemas de controle em áreas de risco para mitigar impactos;
- **Planos de contingência e educação:** desenvolver e avaliar planos de emergência, promovendo educação continuada para a população;

- **Governança e planejamento territorial integrado:** coordenar esforços entre União, estado e municípios para prevenir desastres e adaptar territórios vulneráveis, utilizando comitês de bacias e consórcios regionais para alinhar o uso do solo, recursos hídricos e infraestrutura de forma sustentável, superando a fragmentação política e setorial com abordagens baseadas no território;
- **Redução das desigualdades regionais do RS:** estabelecer estratégias coordenadas para diminuir as disparidades sociais e econômicas entre as regiões;
- **Constituição de base integrada de dados do estado:** criar uma base de dados estadual integrada com apoio universitário para produzir e compartilhar informações de qualidade;
- **Manutenção preventiva e adequada para garantir a eficiência e segurança das infraestruturas:** priorizar manutenções regulares para evitar falhas e aumentar a resiliência das infraestruturas existentes.

5.3. Incorporação dos nichos como perspectiva para espaços urbanos e regionais mais resilientes

Esta diretriz corresponde à dimensão de **nicho**, com exemplos de ações inter-relacionadas às cinco categorias dos sistemas sociotécnicos. O foco está nas práticas locais inovadoras e colaborativas, promovendo a participação ativa das comunidades, a integração de saberes e o desenvolvimento de soluções adaptadas às mudanças climáticas, que também contribuam para o aprimoramento de políticas públicas.

- **Diálogo e difusão de ideias inovadoras a partir das comunidades locais e regionais:** promover espaços de discussão onde as comunidades possam compartilhar soluções



Avenida Borges de Medeiros em Porto Alegre.

- criativas e novas abordagens para os desafios locais e regionais;
- **Caráter popular, heterogêneo e decisivo dos conselhos de planejamento:** garantir que os conselhos de planejamento representem diversas vozes e interesses, assegurando sua capacidade de influenciar decisões importantes sobre o desenvolvimento local;
- **Cooperativas com potencial transformador sustentável:** apoiar e promover iniciativas cooperadas que tragam benefícios sustentáveis e fortaleçam as habilidades e o conhecimento nas comunidades locais;
- **Transição energética vinculada à questão climática:** desenvolver e implementar políticas para uma transição energética justa, que reduza as emissões de carbono e contribua para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas;
- **Programas voltados à emergência climática nas escolas estaduais:** criar e apoiar programas educativos nas escolas estaduais para aumentar a conscientização e disseminar informações sobre a emergência climática junto às comunidades;
- **Iniciativas comunitárias e o monitoramento participativo:** apoiar experiências de coope-

rativas e organizações comunitárias, como agricultura urbana e reciclagem, e incentivar a ciência cidadã para o monitoramento local, promovendo o envolvimento ativo da população nas decisões de forma a complementar as responsabilidades do Estado com políticas públicas de apoio.

5.4. Fomento à pesquisa, extensão e participação das universidades nos esforços de transição sociotécnica

Esta diretriz está relacionada à dimensão de **nicho** e suas interações com as categorias de sistemas sociotécnicos: fontes de conhecimento e discursos culturais. As ações exemplificadas incentivam a pesquisa, a extensão e a participação ativa das universidades nos processos de transição sociotécnica. O foco está na integração de saberes acadêmicos e comunitários, visando promover soluções sustentáveis e adaptativas nos contextos urbanos e regionais:

- **Fomento a parcerias entre universidades, governos e sociedade:** incentivar convênios entre universidades, governos estaduais e municipais para revisar instrumentos normativos relacionados à emergência climática, e promover a articulação entre centros de pesquisa e a sociedade para desenvolver soluções inovadoras que atendam às necessidades locais e regionais;
- **Propostas interfederativas de planejamento urbano e regional, estimulando ações de extensão junto às comunidades:** desenvolver propostas de planejamento que integrem governos e envolvam comunidades vulneráveis para buscar modelos de desenvolvimento integrados à natureza e sustentáveis;
- **Organização de dados e redes de pesquisa:** estruturar dados em redes de pesquisa

regionais para apoiar o planejamento e a gestão territorial;

- **Representação das universidades em conselhos e órgãos de planejamento regional:** assegurar a participação das universidades em conselhos e instituições responsáveis pelo planejamento e governança dos espaços regionais e locais;
- **Estudos sobre a transição sociotécnica:** promover estudos teóricos sobre as etapas da transição sociotécnica e suas implicações para o desenvolvimento sustentável.

5.5. Ênfase em infraestruturas adequadas às transições sociotécnicas

Esta diretriz está relacionada à categoria **tecnologias** dos sistemas sociotécnicos e suas interações com as três dimensões da perspectiva multinível. A diretriz destaca a importância das infraestruturas nos sistemas sociotécnicos e as ações exemplificadas ilustram a interação da categoria tecnologia com as demais categorias. Transformar essas infraestruturas é essencial para fortalecer a resiliência climática e a sustentabilidade em contextos urbanos e regionais.

- **Mobilidade e sistemas sustentáveis:** adaptar o transporte para reduzir emissões e aumentar a resiliência, incentivando modais sustentáveis como o transporte ferroviário e modos ativos (caminhada e bicicleta), enquanto promove redes inteligentes, descentralizadas e sistemas off-grid de abastecimento energético e serviços essenciais;
- **Mudanças comportamentais e soluções baseadas na natureza (SbN):** incentivar mudanças comportamentais que promovam sustentabilidade e resiliência, aliadas à

aplicação de soluções baseadas na natureza (SbN), é essencial para resolver problemas urbanos e climáticos de forma sustentável. As SbN combinam infraestrutura com a restauração de ecossistemas, promovendo adaptação climática e manejo de recursos naturais. São mais adequadas à resiliência por serem multifuncionais e ecológicas, em contraste com as infraestruturas cinzas;

- **Tecnologias da Informação e Comunicação e o monitoramento ambiental:** investir em Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) é crucial para monitorar as ações de mitigação e adaptação climática e os impactos do desenvolvimento urbano em áreas naturais, especialmente nas suscetíveis a desastres. Essas estratégias garantem transparência, envolvimento da sociedade civil e pressão pública para a transição do regime sociotécnico vigente.

6. Conclusões

Este capítulo buscou propor diretrizes para subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas ao Planejamento Urbano e Regional, buscando contribuir para a reflexão sobre espaços urbanos e regionais resilientes às mudanças climáticas no Rio Grande do Sul (RS), a partir do recorte espacial da Região Hidrográfica do Guaíba (RHG). Para a RHG e para a RMPA, como área circunscrita, foram identificadas as limitações do planejamento e da gestão do espaço urbano e regional, considerando a emergência climática como condição grave que exige ações imediatas. Para contextualizar as diretrizes, foram identificadas soluções referenciais nacionais e internacionais de experiências de enfrentamento a desastres hidrológicos similares aos sofridos recentemente no RS. Por fim, a teoria das transições sociotécnicas e a perspectiva multinível fundamentam as

diretrizes que reconhecem a complexa relação entre sociedade e natureza, enfatizando a necessidade de uma transição climática, ecológica e sociotécnica para minimizar os riscos urbanos e garantir um futuro mais sustentável.

¹ Mais informações sobre o programa em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/periferias/periferia-sem-risco>

² Porto Alegre, Pelotas e Bom Jesus.

³ São Sebastião do Caí, São Leopoldo, Viamão e Capela de Santana.

⁴ Colinas, Coqueiro Baixo, Doutor Ricardo, Imigrante, Marques de Souza, Pouso Novo e Roca Sales.

Referências

AGUIAR, C. Atingidos por enchente em Canoas (RS) protestam por moradia e agilidade em programas habitacionais. *Brasil de Fato*, 2024. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

APA – AMERICAN PLANNING ASSOCIATION. *Case Study: Cedar Falls, Iowa*. Disponível em: <https://www.planning.org/research/postdisaster/casestudies/cedarfalls.htm>. Acesso em: 17 out. 2024.

ARAUJO, R. P. Z.; CAMPANTE, A. L. G.; PINHEIRO, C. Planejamento urbano e a dimensão integradora da questão ambiental: revisitando Instrumentos de política urbana para o enfrentamento da emergência climática. COSTA, M. A. (Org.). *Diálogos para uma Política Nacional de Desenvolvimento Urbano: temas transversais à Pnud*. Brasília: Ipea, 2024.

ARAÚJO, R. P. Z. O Estatuto da Cidade e a questão ambiental. FERNANDES, E. (Org.). *20 anos do Estatuto da Cidade: experiências e reflexões*. Belo Horizonte: Gaia Cultural – Cultura e Meio Ambiente, 2021, p. 254-259.

ARCANGELO, W.; VALVERDE, J. *Comunidades mais seguras: construindo planos comunitários de gestão de riscos e emergências*. Cáritas Brasileira, 19 out. 2023. Disponível em: <https://mg.caritas.org.br/noticias/comunidades-mais-seguras-construindo-planos-comunitarios-de-gestao-de-riscos-e-emergencias>. Acesso em: 28 out. 2024.

AVELAR, I. *Katrina e o fracasso ético em Nova Orleans*. Fundação Perseu Abramo, 27 jul. 2007. Disponível em: <https://teoriadebate.org.br>. Acesso em: 10 jul. 2024.

BONI, A.; MÉNDEZ, P. F.; RAMÍREZ, M. Transiciones y transformaciones sociotécnicas. BELDA-MIQUEL, S.; BONI, A. (Orgs.). *Innovación para la transformación social y ambiental: una propuesta desde las transiciones sociotécnicas*. Valencia: Tirant Humanidades, 2023, p. 41-72.

- BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*: promulgada em 5 de outubro de 1988. Brasília-DF: Senado, 1988.
- BRASIL. Estatuto da Cidade. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, S.1 – Atos Poder Legislativo, ano 138, n. 133, de 11/07/2001.
- BRASIL. Estatuto da Metrópole. Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015. Institui o Estatuto da Metrópole e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, S.1 – Atos Poder Legislativo, ano 152, n. 8, de 13/01/2015.
- BRASIL. Lei do Consórcio. Lei nº 11.795, de 8 de outubro de 2008. Dispõe sobre o Sistema de Consórcio. *Diário Oficial da União*, S.1 – Atos Poder Legislativo, ano 145, n. 196, de 09/10/2008.
- BRASIL. Ministério das Cidades. *Periferia sem risco*. 8 mar. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br>. Acesso em: 28 out. 2024.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Resolução ConCidades nº 4, de 17 de maio de 2024a. *Diário Oficial da União*: seção 2. Brasília: Ministério das Cidades, 10 dez. 2024.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade)*. Disponível em: <https://www.defesacivil.rs.gov.br/upload/arquivos/202105/04095316-cobrade-classificacao-e-codificacao-brasileira-de-desastres.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Governo lança plataforma para garantir participação popular na elaboração do Plano Clima*. Brasília, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Marina anuncia na ONU correção da meta climática brasileira*. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- BRENNER, N.; SCHMID, C. Towards a new epistemology of the urban? *City*, v. 19, n. 2-3, 2015, p. 151-182. DOI: 10.1080/13604813.2015.1014712.
- CADEMARTORI, D. Governo Leite desiste de extinguir Metroplan. *Zero Hora*. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://gaulcha-zh.clicrbs.com.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- CARVALHO, W. K. M. et al. Cidades inteligentes, cidades sustentáveis e as mudanças climáticas: um olhar às contribuições dos planos diretores e leis urbanísticas na metrópole paulista. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15, 2019. *Anais [...]*. [S. l.], 2019, p. 471-480. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/en-cac/article/view/3918>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- Cerca de 400 pessoas atingidas por enchentes realizam ato em Lajeado. *Correio do Povo*, 2024. Disponível em: <https://www.correiodopovo.com.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- CIMELLARO, G. P.; REINHORN, A. M.; BRUNEAU, M. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, v. 32, n. 11, 2010, p. 3639-3649. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.08.008.
- COLLISCHONN, W. et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, v. 1, 2025. Disponível em: <https://www.hydroshare.org/resource/d9e5c2ffb49a4b729b240f3eb3084ff4>.
- COSTA, H. et al. Urban water management and planning: urban sanitation policies and an emerging institutional structure. *International Journal of Water*, v. 4, 2012, p. 250-269.
- COSTA, H. S. de M.; CAMPANTE, A. L. G.; ARAÚJO, R. P. Z. A dimensão ambiental nos planos diretores de municípios brasileiros: um olhar panorâmico sobre a experiência recente. SANTOS JR.; O. A.; MONTANDON, D. T. (Orgs.). *Os planos diretores municipais pós-Estatuto da Cidade: balanço crítico e perspectivas*. Rio de Janeiro: Letra Capital; Observatório das Metrópoles, 2011, p. 173-217.
- COSTA, H. S. de M. A trajetória da temática ambiental no planejamento urbano no Brasil: o encontro de racionalidades distintas. COSTA, G. M.; MENDONÇA, J. G. de (Orgs.). *Planejamento urbano no Brasil: trajetória, avanços e perspectivas*. Belo Horizonte: C/Arte, 2008, p. 80-93.
- DEE – DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA; DEPLAN – DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO GOVERNAMENTAL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão – SPGG. *MUPRS – Mapa Único do Plano Rio Grande*. 2024. Disponível em: <https://mup.rs.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- DEFESA CIVIL-RS. *Extrato de ocorrências*: óbitos e desaparecidos. Minuto a minuto, 20 ago. 2024. Disponível em: <https://sosenchentes.rs.gov.br/>. Acesso em: 7 nov. 2024.
- EMILIANO, E. Integração das políticas setoriais urbanas e ambientais: alguns diálogos possíveis. Enanpur. *Anais*. Sessões Temáticas, 2015. Disponível em: <https://anais.anpur.org.br>. Acesso em: 1º nov. 2024.
- ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. *Cadernos Metrópole*, v. 22, n. 48, 2020, p. 365-396. DOI: 10.1590/2236-9996.2020-4802.
- FALEIRO, F. Atingidos pelas enchentes em Eldorado do Sul protestam por moradias. *Correio do Povo*, 2024. Disponível em: <https://www.correiodopovo.com.br/>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- FERREIRA, M. Mapa feito por pesquisadores da UFRGS reúne dados sobre abrigos, cozinhas solidárias e pontos de coleta. *Brasil de Fato*, 2024. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/>
- GEELS, F. W.; SCHOT, J. W. The dynamics of transitions: a socio-technical perspective. GRIN, J. et al. (Eds.). *Transitions to sustainable development: new directions in the study of long term transformative change*. New York: Routledge, 2010. p. 9-87.
- GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multilevel perspective and a case-study. *Research Policy*, v. 31, n. 8-9, 2002, p. 1257-1274. DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00062-8.
- HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 4, n. 1, 1973, p. 1-23. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2096802>.
- IBDU – INSTITUTO BRASILEIRO DE DIREITO URBANÍSTICO. Nota do IBDU contra a extinção do Ministério das Cidades. *Notas e Manifestos*. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://ibdu.org.br/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Munic – Pesquisa de Informações Básicas Municipais*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/>. Acesso em: 12 dez. 2024
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produto Interno Bruto dos municípios 2021*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/>. Acesso em: 12 dez. 2024
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Relatório do INPE explica evento meteorológico que causou a tragédia no RS*. São José dos Campos: Inpe, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- INSTITUTO POLIS. *Plano Comunitário de Ponta Negra (RJ)*. Disponível em: <https://polis.org.br/projeto/plano-comunitario-de-ponta-negra-rj/>. Acesso em: 7 nov. 2024.
- JALOWITZKI, I. A. de F. et al. Processo participativo e regeneração urbana no Japão pós-desastre: o caso do vilarejo de Shibitachi. SOUTO, de; FERNANDES, M. do C. (Orgs.). *Mapeamento participativo e cartografia social: aspectos conceituais e trajetórias de pesquisa*. Rio de Janeiro: Instituto Virtual para o Desenvolvimento Sustentável – Ivides.org, 2021, v. 1, p. 120-144.
- JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. *Cidades e inundações: um guia para gestão integrada do risco de inundação urbana para o século XXI*. Washington: Banco Mundial, 2012. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br>. Acesso em: 20 set. 2024.
- KRAUSE, C. Habitação, urbanização e regularização fundiária de assentamentos autoproduzidos em uma política nacional de desenvolvimento urbano: algumas contribuições. COSTA, M. A. (Org.). *Diálogos para uma Política Nacional de Desenvolvimento Urbano: temas transversais à Pnud*, v. 3. Brasília: Ipea, 2024, p. 31-48.
- MOHINUDDIN, Md. Community-Based Disaster Management (CBDM). *SW Educare BD*, 14 jan. 2020. Disponível em: <https://www.sweducarebd.com/2020/01>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- NOBRE, C. As metrópoles brasileiras no contexto das mudanças climáticas: entrevista com Carlos Nobre. COSTA, M. A. (Org.). *50 anos de regiões metropolitanas no Brasil e a Política Nacional de Desenvolvimento Urbano: no cenário de adaptação das cidades às mudanças climáticas e à transição digital*. Brasília: Ipea, 2024.
- OLAZABAL, M. et al. What is limiting how we imagine climate change adaptation? *Current Opinion on Environmental Sustainability*, v. 7, 101476, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.cosust.2024.101476.
- OLIVEIRA, C. M. de; NICOLINI, I. Revisão de Planos Diretores no neoliberalismo avançado: o caso de Porto Alegre, RS. *Cadernos Metrópole*, v. 26, n. 61, 2024, p. e6160374. DOI: 10.1590/2236-9996.2024-6160374-pt.
- PLYER, A. *Facts for features: Katrina impact*. The Data Center, 2016. Disponível em: <https://www.datacenterresearch.org/>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- PORTO ALEGRE. *Lei Complementar nº 646, de 10 de julho de 2010*. Institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre – PDDUA. Porto Alegre: Prefeitura Municipal, 2010.
- PORTO ALEGRE. *Estratégia de resiliência de Porto Alegre*. Porto Alegre: Prefeitura Municipal, 2016. Disponível em: <https://resilientcitiesnetwork.org/>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- PORTO ALEGRE. Lei Complementar nº 872, de 10 de janeiro de 2020. Institui a Política de Sustentabilidade, Enfrentamento das Mudanças Climáticas e Uso Racional da Energia, cria o Programa de Premiação e Certificação em Sustentabilidade Ambiental de Porto Alegre e dá outras providências. *Diário Oficial de Porto Alegre*, Porto Alegre, 2020.
- PORTO ALEGRE. Secretaria Municipal do Meio Ambiente, Urbanismo e Sustentabilidade. *Plano de Ação Climática*. Porto Alegre: Prefeitura Municipal, 2024. Disponível em: <https://prefeitura.poa.br/>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- RIO GRANDE DO SUL. *Constituição Estadual do Estado do Rio Grande do Sul*. Disponível em: <https://www2.al.rs.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- RIO GRANDE DO SUL. *Governo e Univates assinam termo para revisão de Planos Diretores no Vale do Taquari*. 2024b. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/>.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Reconstrução Gaúcha. *Plano Rio Grande*. 2024a. Disponível em: <https://planoriogrande.rs.gov.br/inicial>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e da Infraestrutura. *ProClima2050: Estratégias para o enfrentamento das mudanças climáticas do Rio Grande do Sul*. 2023. Disponível em: www.proclima2050.rs.gov.br/. Acesso em: 12 dez. 2024.
- SAITO, S. M. et al. Fortalecendo laços: cooperação intermunicipal para redução de risco de desastres. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, 2021. DOI: 10.1590/2175-3369.013.e20200403.
- SCHWAB, J. C. *Planning for post-disaster recovery: next Generation*. Relatório PAS 576. APA – American Planning Association, 2014. Disponível em: <https://www.planning.org/publications/report/9026899/>. Acesso em: 17 out. 2024
- SOININEN, Niko et al. A brake or an accelerator? The role of law in sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 41, 2021, p. 71-73.
- UNDRR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. *What is the Sendai Framework?* 18 mar. 2015. Disponível em: <https://www.undrr.org>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- VERNADSKII, V. I. *The biosphere*. Oracle, AZ, EUA: Synergetic Press, 1986. Disponível em: <https://content.cosmos.art/>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- VISCONTI, C.; CARRARO, V.; INZUNZA, S. Mapeo colectivo como metodología participativa para el estudio de riesgos de la planificación urbana comunal: una propuesta para Chile. CAMPOS, Katherine (Org.). *Serie Policy Papers Cigiden*. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (Cigiden), 2021. Disponível em: <https://www.cigiden.cl/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

Equipe de trabalho

Ana Elísia da Costa

Doutora em Teoria, História e Crítica da Arquitetura, PROPAR/UFRGS
Professora do Departamento de Arquitetura Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Ankita Sood

Doutora em Planejamento Urbano, IIT Roorkee, Índia
Professora visitante no Chandigarh College of Architecture, Chandigarh, Índia
Curso de Desenho Urbano e Cidades Contemporâneas.

Bárbara Giacom

Doutora em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR/UFRGS
Professora do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Clarice Misoczky de Oliveira

Doutora em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR/UFRGS
Professora do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Eugenia Aumond Kuhn

Doutora em Engenharia Civil, PPGE/UFRGS
Professora do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Geisa Zanini Rorato

Doutora em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR/UFRGS
Professora do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Heleniza Avila Campos

Doutora em Geografia, PPGG/UFRJ
Professora do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Humberto Teixeira Damilano

Arquiteto e urbanista, Unisinos
Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Inês Martina Lersch

Doutora em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR/UFRGS
Professora do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Isabelle Carolina Mangoni Soares

Arquiteta e urbanista
Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Júlio Celso Borello Vargas

Doutor em Engenharia de Transportes, UFRGS
Professor do Departamento de Urbanismo
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Luciana Inês Gomes Miron

Doutora em Engenharia Civil, PPGE/UFRGS
Professora do Departamento de Arquitetura
Curso de Arquitetura e Urbanismo e Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional/PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS

Nicole Bueno Leal de Almeida

Mestre em Planejamento Urbano e Regional, PROPUR/UFRGS
Doutoranda no Programa de Planejamento Urbano e Regional, PROPUR
Faculdade de Arquitetura, UFRGS





Adaptação e resiliência a cheias no Rio Grande do Sul no contexto da variabilidade e mudança climática

RODRIGO CAUDURO DIAS DE PAIVA
WALTER COLLISCHONN
PEDRO TORRES MIRANDA
FERNANDO MAINARDI FAN
ANDERSON RUHOFF





RESUMO

O desastre de 2024, ocorrido no estado do Rio Grande do Sul, ocorreu em um contexto de variabilidade climática observada nos últimos anos e de mudanças no clima previstas para as próximas décadas. Esse contexto requer a adaptação da sociedade para reduzir os prejuízos socioeconômicos potenciais. Neste artigo discute-se, com base em dados históricos, como grandes cheias já ocorreram na região e têm sido cada vez mais intensas e frequentes. Apresentamos projeções do impacto da mudança climática que demonstram o aumento nas precipitações e cheias extremas, com destaque para a região Sul do Brasil. Finalmente, são discutidas alternativas visando à adaptação e resiliência, como obras de infraestrutura (medidas estruturais), ações para convivência com a cheias (medidas não estruturais), soluções baseadas na natureza e reconstruir melhor.



Ricardo Stuckert/Secom PR

Centro de Porto Alegre durante inundação, em 2024.

1. O contexto

O desastre de 2024 ocorrido no estado do Rio Grande do Sul pode ser considerado um dos maiores da história no Brasil (Collischonn *et al.*, 2025), levando em conta o quão extremo foi o evento hidrológico, sua grande abrangência e todos os seus impactos negativos. Ao mesmo tempo, as projeções relacionadas à mudança climática apontam para o aumento de desastres naturais como os associados às precipitações e cheias extremas (Arias, 2021; Brêda *et al.*, 2023). No momento que este artigo é finalizado, 2024 já é considerado o ano mais quente dos

registros históricos, em que, pela primeira vez, a temperatura global excedeu em 1,5°C os níveis pré-industriais (Copernicus, 2025), e ocorreram inúmeros extremos climáticos ao redor do mundo como cheias, secas, ondas de calor e incêndios. Esse contexto requer a adaptação da sociedade às novas condições climáticas, a fim de reduzir e evitar seus danos potenciais (IPCC, 2022). E a maior resiliência às cheias, significando a redução da vulnerabilidade e prejuízos associados e maior capacidade de recuperação após desastres.

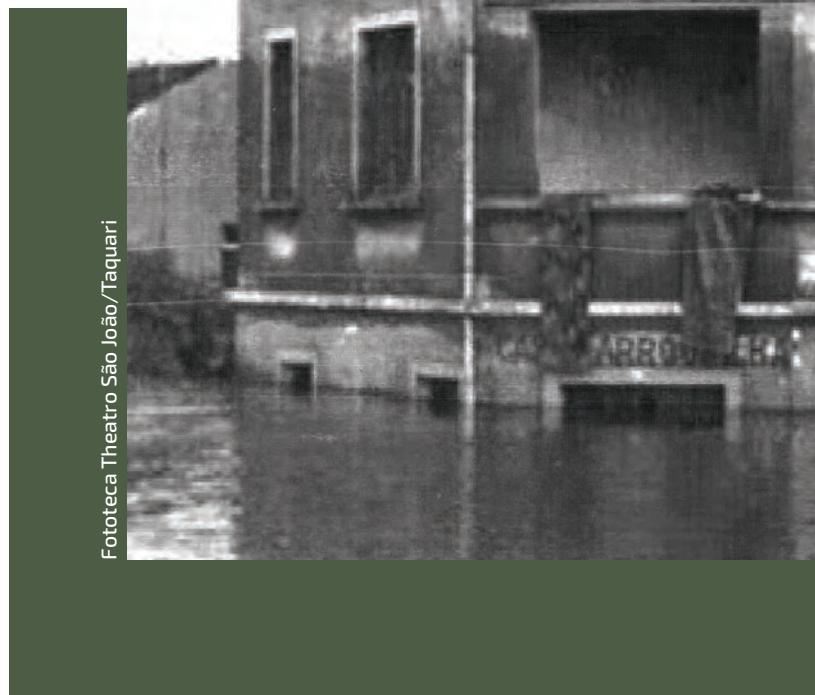
Enquanto o Rio Grande do Sul ainda se recupera da catástrofe de 2024, diversas questões ainda não estão esclarecidas para a população

e tomadores de decisão, como: Esse tipo de evento já ocorreu no passado e era esperado que ocorresse novamente? O que se pode esperar para o futuro? Que medidas podem ser tomadas para aumentar a resiliência às cheias extremas e para a adaptação à mudança climática?

O primeiro artigo deste livro traz uma descrição da cheia de 2024 no Rio Grande do Sul. No presente artigo discute-se, com base em dados históricos, como grandes cheias já ocorreram na região e têm sido cada vez mais intensas e frequentes. Apresentamos projeções do impacto da mudança climática que demonstram o aumento nas precipitações e cheias extremas, com destaque para a região Sul do Brasil. Nesse contexto, são discutidas alternativas visando à adaptação e resiliência, como obras de infraestrutura (medidas estruturais), ações para convivência com as cheias (medidas não estruturais), soluções baseadas na natureza e o reconstruir melhor. Por fim, são apresentadas considerações finais e recomendações.

2. As cheias históricas esquecidas

Um dos aspectos que chama a atenção do desastre de 2024 foi a falta da percepção de risco da população. Por exemplo, os relatos trazidos por Malionsky *et al.* (2024) demonstram claramente que grande parte das pessoas afetadas na Região Metropolitana de Porto Alegre não sabia que estava em uma área inundável, nem como funcionava o sistema de proteção contra cheias. Além disso, não havia planos efetivos de contingência para ações de evacuação. Inúmeras instituições estratégicas como hospitais, bombeiros, tribunais e prédios de governo e justiça também se encontravam em áreas inundáveis. De alguma forma, pode-se interpretar que, para grande parte da população gaúcha, esse tipo de evento extremo era inimaginável, considerado impossível de ocorrer.



Entretanto, cheias de consequências desastrosas já ocorreram em inúmeras regiões do mundo (por exemplo na Espanha em 2024, Líbia em 2023, Alemanha e países europeus em 2021, Estados Unidos em 2017 pelo Furacão Harvey) e são conhecidas pela ciência hidrológica, como descrito por Montanari *et al.* (2024). Segundo esses autores, a percepção de risco e preparação para cheias normalmente é governada pela experiência com eventos passados. E a prevenção acaba sendo maior para os eventos mais frequentes e de menor magnitude, sendo pequena para os eventos mais raros e de maior magnitude, mas que podem causar consequências desastrosas. Nesse contexto, uma “cheia impossível” seria aquela de grandes proporções e que excede as expectativas baseadas na experiência histórica, conforme definido por Montanari *et al.* (2024). Alguns fatores podem causar um mau julgamento em relação à pro-



Foto histórica da enchente de 1940 no Rio Taquari, em Taquari, RS.

babilidade de ocorrência de uma cheia extrema desse tipo, incluindo aspectos físicos (como mudanças climáticas ou ambientais), psicológicos, socioeconômicos ou ainda a partir da combinação desses.

Esse tipo de fenômeno também pode ser interpretado como um Cisne Negro, conceito introduzido por Taleb (2021). Um Cisne Negro é um evento considerado pouco provável e imprevisível, mas que produz um grande impacto. Apesar da sua aparente anormalidade, buscamos uma explicação que o faça parecer menos aleatório e mais previsível do que de fato foi. Assim, considerando a sua imprevisibilidade e inevitabilidade, o mais adequado seria buscar pela máxima proteção contra seus grandes impactos negativos.

Considerando o foco para o Rio Grande do Sul, cheias extremas como a de 2024 já ocorreram no

passado. O caso mais emblemático é o da cheia de 1941 (Figura 1a), que era, até 2024, a maior cheia já registrada, e o principal evento hidrológico que motivou a concepção do sistema de proteção contra cheias de Porto Alegre e da região metropolitana.

A Figura 1b apresenta a série histórica de níveis d'água máximos anuais no Guaíba, em Porto Alegre. Essa informação é representativa da evolução temporal das inundações na região. O monitoramento sistemático em estações fluviométricas com leituras manuais em réguas (também conhecidas como réguas linimétricas) iniciou em 1899, se estendendo até os dias atuais, com o uso recente de estações telemétricas, que transmitem a informação do nível da água em tempo real. O nível d'água médio das cheias anuais desde 1899 é de, aproximadamente, dois metros, considerando o ponto de medição do Cais Mauá (Centro da cidade). A partir da cota de três metros, nessa mesma referência, é atingida a cota de inundação, e as águas do Guaíba potencialmente invadem a cidade de Porto Alegre em diversos pontos.

Conforme a série histórica, no início do século XX, até meados da década de 1920, as cheias anuais foram de pequena magnitude, não ocorrendo a superação da cota de inundação. Nesse período foram registrados níveis d'água abaixo da média histórica. Entretanto, o período entre as décadas de 1920 e 1970 foi marcado por grandes cheias. Ocorreram cinco eventos que alcançaram a cota de inundação da região, com destaque para o ano de 1941, em que o nível do Guaíba chegou à marca de 4,75 metros, sendo o recorde registrado antes da ocorrência do desastre de maio de 2024. Esse período motivou a construção de sistemas de controle de cheias para a região, no final da década de 1960, compostos principalmente por diques para prevenir a entrada das águas do Guaíba e seus afluentes em Porto Alegre e algumas das cidades da região metropolitana.

Na região central de Porto Alegre, o sistema foi dimensionado considerando a cota da cheia de 1941 mais uma margem de segurança, atingindo assim a cota seis metros.

Entretanto, as décadas seguintes à construção do sistema de proteção foram marcadas por cheias pequenas na região. Nas décadas de 1970 a 1990 ocorreram cheias abaixo da média, enquanto os anos entre 2000 e 2014 foram relativamente neutros. Notavelmente, durante o período de quase meio século, entre 1967 e 2014, não ocorreram cheias que superaram a cota de inundação de três metros. Ou seja, o período de várias décadas posterior às cheias de 1941 e 1967 foi marcado pela ausência de cheias importantes, e esse período coincide com um momento de grande expansão urbana na região metropolitana (Soares e Fedozzi, 2016; Miranda *et al.*, 2016). Ao mesmo tempo, a não ocorrência de cheias causadoras de inundação de grande magnitude na história recente da região pode ter motivado um esquecimento em relação a essa problemática. Dessa forma, cheias de grande magnitude como as de 1941 ou 2024 podem ter se tornado algo como uma “cheia impossível” (definição de Montanari *et al.*, 2024) no imaginário da população e tomadores de decisão, levando a menor preparação e maior vulnerabilidade.

Em contraste com as décadas anteriores, a década mais recente, entre 2015 e 2024, foi um período rico em cheias na região, com destaque para os anos de 2015, 2023 e 2024, nos quais se observou a atuação do fenômeno climático El Niño (WMO, 2024). Períodos de El Niño são tipicamente marcados por ocorrência de maiores volumes de precipitação e maior probabilidade de cheias no Sul do Brasil (Petry *et al.*, 2024; Kuchinski, 2024). Em 2015, após um longo período sem grandes cheias, o nível do Guaíba se elevou até 2,97 m, e se aproximou, pela primeira vez em muito tempo, da cota de inundação. Outras cheias

Figura 1. (a) Registros das duas maiores cheias na cidade de Porto Alegre, nos anos de 1941 (fotos à esquerda) e de 2024 (fotos à direita). (b) Série temporal de nível d'água máximo anual em Porto Alegre (círculos azuis). O gráfico mostra três cotas de referência: (i) Cota do sistema de proteção contra cheias; (ii). Cota de inundação; e, (iii) Nível médio da série. A série histórica foi dividida em cinco janelas temporais distintas, ressaltando a variabilidade temporal das cheias no local. Os quatro maiores eventos registrados (2024, 1941 e dois em 2023) estão enumerados na Figura 1(b).

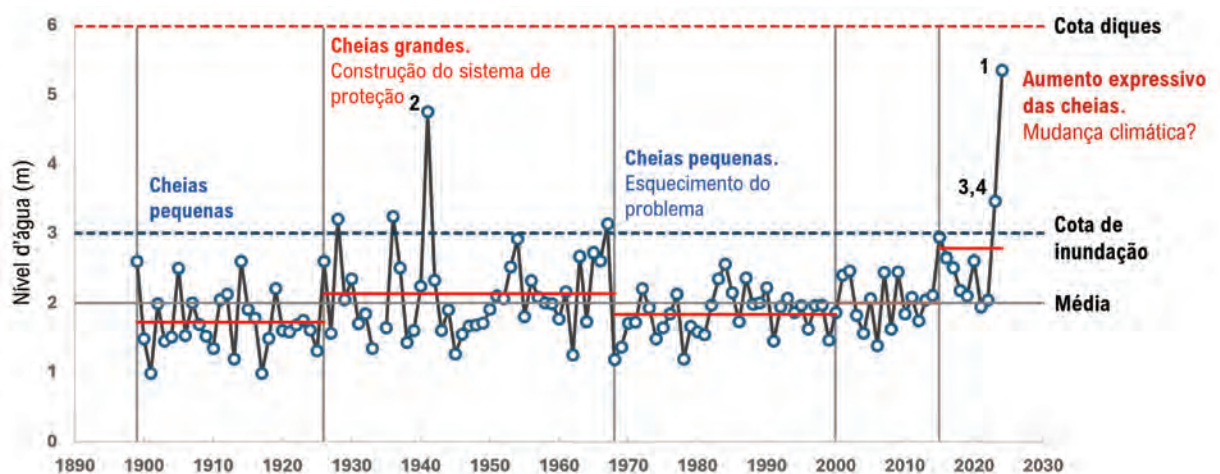
relevantes em outros anos ocorreram no interior do estado, como a cheia em 2020 na Bacia do Taquari-Antas. Já os anos de 2023 e 2024 foram marcados por eventos hidrológicos extremos.

Em julho de 2023 ocorreram cheias rápidas em rios do RS, causando perdas de vida. Em setembro de 2023, o Rio Taquari-Antas já havia atingido o seu novo recorde, sendo no momento considerado o pior desastre do RS pela quantidade de perdas de vida e impactos negativos. Também em setembro de 2023 o Guaíba superou a cota de inundação, chegando à marca de 3,15 m. Apenas dois meses depois, em novembro de 2023, um novo evento resultou em cheias em diversos rios da região. Nessa ocasião, o Guaíba, em Porto Alegre, atingiu a cota 3,46 m, constituindo a segunda maior marca da história até aquele momento. Os impactos foram grandes em locais como o Vale do Taquari, mas pequenos na Região Metropolitana de Porto Alegre, protegida por diques. Surpreendentemente, após poucas semanas o debate público na região já era focado em outros temas e não na busca por



Centro de Porto Alegre/RS
1941

Centro de Porto Alegre/RS
2024



maior segurança relacionada a cheias, incluindo a remoção dos diques do sistema de proteção contra cheias em Porto Alegre.

O ano de 2024 iniciou com fortes temporais em janeiro, trazendo precipitação intensa e alagamentos, e destruição como resultado de fortes ventos. Por fim, entre o final de abril e o começo de maio de 2024 ocorreram precipitações extremas em intensidade, volume e extensão espacial recordes, causando o desastre sem precedentes descrito no Artigo 1. Em muitos rios foram registrados os maiores níveis históricos. Por exemplo, o Guaíba chegou na marca recorde de 5,37 m. Embora essa marca esteja abaixo da cota de projeto do sistema de proteção contra cheias, falhas em diversos pontos não preveniram a entrada das águas de inundação nas cidades dessa região (ver Artigo 1 deste livro).

Com base nessas observações históricas, é possível concluir que ocorreram cheias extremas nessa região capazes de causar grandes desastres (e.g. 1941 e 2024) com uma recorrência da ordem de meio século. Considerando a expectativa de vida média da população, é razoável esperar que um cidadão dessa região possa vivenciar uma cheia dessa magnitude pelo menos uma vez em sua vida. A probabilidade de ocorrência de pelo menos um evento desse tipo, em um horizonte de médio prazo, também é elevada, sendo da ordem de 20% em uma década. Além disso, não há nada que impeça que a ocorrência de uma cheia em um dado ano não possa ser seguida por outra grande cheia nos anos seguintes. Por exemplo, a ocorrência de uma cheia em 2024 foi precedida por uma grande cheia em 2023, e podendo se repetir nos próximos anos. Essas simples observações baseadas em dados históricos já deveriam ser suficientes para motivar grandes investimentos em medidas de prevenção aos desastres hidrológicos.

3. Cheias extremas são crescentes e mais frequentes que o esperado

A série histórica de níveis d'água no Guaíba revela outro aspecto preocupante. Ela demonstra que, no período recente, as cheias extremas podem estar se tornando maiores e mais frequentes do que previamente esperado.

A década mais recente, entre 2015 e 2024, foi um período abundante em cheias na região, em que ocorreram níveis d'água muito superiores, em média, aos observados anteriormente. Nesse período, a média histórica de cheias de 2 m (linha cinza na Figura 1b) foi superada pelo menos uma vez em quase todos os anos no Guaíba, em Porto Alegre. Além disso, enquanto no período anterior, de 1899 a 2014, a cota de inundação de 3 m foi superada apenas em cinco dos 115 anos, no período recente, de apenas dez anos, essa marca já foi atingida ou superada quatro vezes. Esse padrão de aumento da frequência das cheias pode ser observado em outras séries históricas da região.

A tendência recente de aumento das cheias no Guaíba não é um caso isolado. Diversos estudos, como é o caso de Chagas *et al.* (2022), identificaram tendências de crescimento na magnitude e frequência das cheias, na região Sul do Brasil. Idealmente, essa tendência crescente deveria ser considerada no planejamento para a minimização do impacto de eventos hidrológicos extremos.

As cheias possuem comportamento aleatório que dificulta a sua previsibilidade em um dado ano ou mês. Dada essa característica, muitas vezes são estudadas por meio da análise estatística, em que não se prevê exatamente quando uma cheia vai ocorrer, mas em que se estima a probabilidade de ocorrência em um período qualquer. Nessa situação, uma

série histórica hidrológica é considerada estacionária se é livre de tendências, quebras ou periodicidade, e se seus parâmetros estatísticos são constantes no tempo. Essa é a premissa básica que vem sendo adotada há décadas por hidrólogos e engenheiros para o planejamento na gestão dos recursos hídricos e em projetos de infraestrutura como barragens, sistemas de drenagem, pontes, mapeamento de áreas de risco de inundação etc. Nesse contexto, as previsões hidrológicas são tipicamente realizadas usando observações do passado, e assumindo que as características estatísticas se mantêm no futuro.

Entretanto, como podemos observar na série de níveis d'água das cheias do Guaíba (Figura 1b) e nos estudos recentes, as cheias têm apresentado comportamento não estacionário, contestando a premissa tradicionalmente utilizada nas previsões hidrológicas.

Essas alterações na magnitude e frequência de cheias em diferentes regiões do mundo podem estar associadas a diferentes fatores (Blöschl, 2022). Por exemplo, mudanças na cobertura do solo (desmatamento, impermeabilização pela urbanização, compactação pela agricultura) podem aumentar as cheias em bacias pequenas e alagamentos em cidades, mas não sendo o principal fator em grandes cheias em bacias médias a grandes. Intervenções estruturais (e.g. canalizações, dragagens e reservatórios) também podem ter efeito na alteração de cheias em rios e bacias de menor porte e principalmente em cheias pequenas e médias. Mas é a mudança climática que pode trazer as maiores alterações nas cheias, tanto em pequenas bacias e alagamentos em cidades, como em rios maiores e na inundação fluvial. As alterações nas cheias em bacias de médio e grande porte que causam inundações em grandes rios como as observadas em 2024 são, normalmente, associadas à variabilidade

climática natural ou à mudança do clima. Esse tipo de alteração tem sido associado à intensificação do ciclo hidrológico devido à mudança climática.

4. O Sul do Brasil é o local com maior projeção de aumento de cheias pela mudança climática

O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (Arias, 2021) apresenta evidências de mudanças climáticas antropogênicas causadas por emissões de gases de efeito estufa (GEE), resultando no aquecimento da atmosfera e alterações no clima global e regime de chuvas. Esse fenômeno pode causar alterações em eventos hidrológicos extremos, seja em frequência e/ou intensidade, trazendo impactos sociais, ambientais e econômicos significativos.

Nesse sentido, projeções do impacto da mudança climática nos recursos hídricos nacionais, com foco em eventos hidrológicos extremos, como cheias e secas, e na segurança hídrica nacional, foram elaboradas, recentemente, pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS em um projeto de pesquisa em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), conforme documentado em Paiva *et al.* (2024a,b). Nesse estudo, foram desenvolvidas inúmeras simulações computacionais do ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas e rios da América do Sul, considerando os resultados de cálculos de modelos climáticos globais capazes de representar o efeito do aquecimento global sobre as chuvas e outras variáveis meteorológicas¹. Foi considerado um cenário intermediário de emissões de gases de efeito estufa nas próximas décadas. Os resultados no contexto da alteração nas vazões de cheias dos rios da América do Sul estão resumidos na Figura 2. As cores amarelas indicam projeção de redução de cheias, tons de verde e azul (painel da esquerda), indicam o

grau de aumento na magnitude, e tons de azul e roxo (painel da direita) o grau de aumento na frequência das cheias.

Conforme essas projeções (Figura 2), é justamente na região Sul do Brasil onde há o maior sinal de aumento de cheias em resultado da mudança climática. É esperado um aumento nas precipitações intensas de curta duração (por exemplo, um dia) em praticamente todo o Brasil. O aumento nas chuvas intensas traz preocupações sobre a intensificação de cheias em bacias pequenas e alagamentos em áreas urbanas. Mas quando se avaliam as cheias em rios de médio a grande porte, causadores de grandes inundações como a ocorrida no evento de 2024, são projetados aumentos na região Sul, incluindo Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, e também no Uruguai e parte da Argentina, em partes do Nordeste brasileiro, no Peru, Bolívia e Equador. Por outro lado, é esperada a redução de cheias nos grandes rios do centro do Brasil e partes da Amazônia, causado pelo aumento das perdas d'água por evapotranspiração e redução da umidade do solo antecedente ao período de cheia (Brêda *et al.*, 2023). Essas projeções para o futuro são coerentes com as observações de tendências recentes (e.g. Chagas *et al.*, 2022) e estudos anteriores (e.g. Brêda *et al.*, 2023).

Ainda de acordo com os resultados descritos por Paiva *et al.* (2024a,b), as projeções indicam que o aumento da magnitude das vazões máximas dos rios da região Sul durante as cheias pode ser da ordem de 20%, ampliando os impactos de eventos como o de 2024. Por exemplo, isso poderia causar um acréscimo da ordem de três metros no nível d'água máximo nos rios da região da Serra, equivalente ao tamanho de um andar de uma edificação. A área inundada e população afetada seria maior, podendo haver maior destruição por escoamento com maior velocidade e profundidade. Pessoas que

se salvariam se abrindo em um segundo pavimento não teriam essa alternativa. Em outras regiões, como a Região Metropolitana de Porto Alegre banhada pelo Guaíba, um aumento de 20% na vazão pode resultar em um aumento da ordem de 50 cm a um metro nos níveis d'água, e uma ameaça adicional pela superação dos níveis dos sistemas de proteção contra cheias atuais, que foram dimensionados considerando o clima passado. Além disso, as cheias extremas podem se tornar até 5x mais frequentes. Isso significa que um evento extremo que atualmente ocorre, em média, a cada 50 anos, no futuro poderia ocorrer, em média, a cada 10 anos, aumentando os impactos negativos.

5. Adaptação e resiliência

Nos itens anteriores demonstra-se que as cheias recentes ocorridas no Sul do Brasil não são eventos isolados, que há uma tendência crescente na intensidade e frequência das cheias nessa região, o que é, exatamente, o que se projeta que deve acontecer ao longo do século XXI, em consequência da mudança climática. Nesse contexto, é fundamental discutir formas de adaptação e de incrementar a resiliência da sociedade aos futuros eventos de cheias. Entre as possíveis alternativas estão as medidas clássicas de controle de cheias, novas soluções baseadas na natureza e a abordagem de reconstruir melhor.

As medidas mais clássicas para redução do impacto das inundações podem ser classificadas em estruturais e não estruturais (Canholi, 2005; Tucci, 2007).

Medidas estruturais são aquelas que modificam o ambiente, visando eliminar as cheias, ou ao menos reduzir as vazões máximas, diminuir os níveis d'água máximos, ou reduzir a extensão das áreas inundadas. Em outras palavras, busca-se modificar a natureza para adaptá-la à ocupação do espaço dada pela sociedade.

Alteração de cheias severas em rios médios e grandes

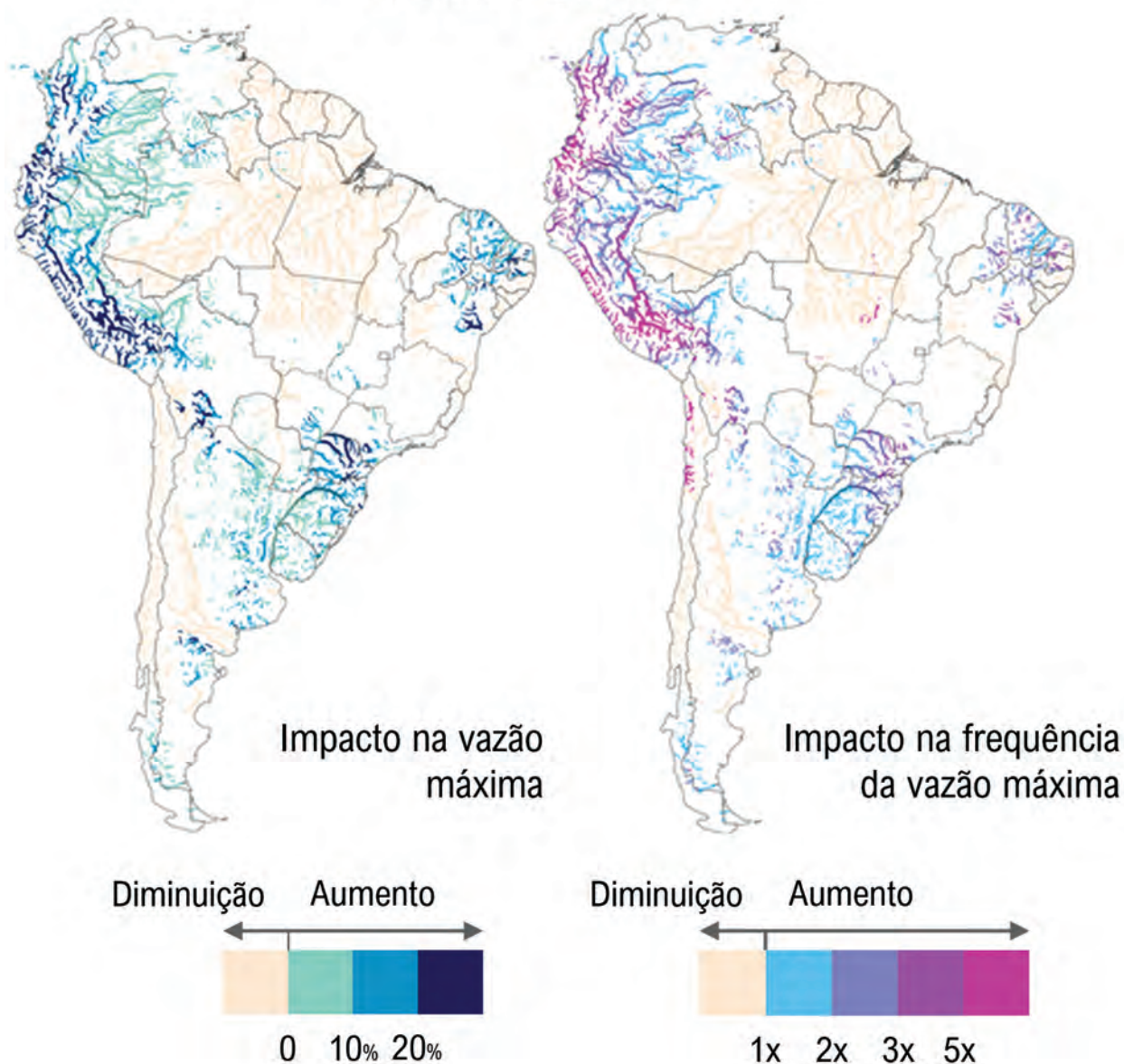


Figura 2. Mapas de projeção do impacto da mudança climática sobre a magnitude (esquerda) e frequência (direita) de cheias severas nos rios da América do Sul. Foram consideradas cheias severas as que ocorrem ou são superadas, em média, uma vez a cada 50 anos. Os mapas mostram o aumento de vazão em valores percentuais e o aumento na frequência em número de vezes (e.g. o valor 3x indica que cheias severas serão três vezes mais frequentes).

Medidas não-estruturais são aquelas que buscam reduzir os impactos negativos das inundações pela introdução de normas, regulamentos e procedimentos que melhoram o convívio da população com as cheias, ou seja, sua resiliência. Ou seja, busca-se adaptar a ocupação do espaço às condições dadas pela natureza.

As medidas estruturais podem ser classificadas ainda como intensivas ou extensivas, de acordo com a escala espacial de sua implementação. Medidas estruturais intensivas são obras como ampliação de canais, criação de desvios e túneis, construção de barragens para reter a água das cheias em reservatórios, construção de diques para evitar a inundação de certas áreas protegidas e a dragagem de rios naturais. Medidas estruturais extensivas são intervenções distribuídas na bacia hidrográfica, como a recomposição da cobertura vegetal, o controle da erosão do solo, a recuperação da mata ciliar, e a recomposição de brejos e banhados. Essas medidas extensivas se confundem com as Soluções Baseadas na Natureza, discutidas no item 5.3.

As principais medidas não estruturais são o zoneamento e regramento de ocupação das áreas com risco de inundação, os seguros contra inundação e os sistemas de previsão e alerta de cheias.

Ao longo do século XX, a experiência em diversos países demonstrou que confiar exclusivamente em medidas estruturais intensivas, como barragens, diques e canais, poderia resultar não em uma diminuição, mas em um aumento dos impactos das cheias. Com base nessa experiência anterior, as diversas medidas de adaptação e aumento de resiliência são discutidas e avaliadas de acordo com a sua viabilidade e utilidade nos itens a seguir.

5.1. Medidas estruturais têm efeito limitado na redução de cheias extremas

Após um grande desastre, como a cheia de 2024 no RS, é comum que, no debate público, se busque uma causa particular e uma solução específica para controlar futuros eventos extremos. Ainda sob o forte impacto socioeconômico da ocorrência recente, tipicamente são sugeridas soluções do tipo “bala de prata”, que poderiam, de forma definitiva, eliminar os problemas das cheias.

Isto foi, exatamente, o que ocorreu após a cheia de 1941, quando foram sugeridas medidas como a inversão do fluxo do Rio Gravataí para litoral, a construção de barragens de controle de cheias em toda a bacia hidrográfica, o isolamento da região portuária de Porto Alegre por um sistema de docas com comportas, e o sistema de diques que, finalmente, acabou por ser construído (DNOS, 1968; Guimaraens, 2009).

Após a cheia de maio de 2024 têm se discutido sobre grandes obras de engenharia que pudessem reduzir o risco de cheias no RS, com sugestões de construção de barragens, ampliação de canais através de dragagem, e desvios dos rios e lagos. Para qualificar a discussão sobre as medidas estruturais de controle de cheias, é importante distinguir as vantagens e desvantagens de cada uma dessas medidas.

5.1.1. Barragens e reservatórios de controle de cheias

Uma barragem de controle de cheias é uma barreira artificial construída sobre o curso d'água, para a retenção de grandes quantidades d'água em um lago artificial (reservatório) durante a ocorrência da cheia, e liberação lenta depois que o período mais crítico já tenha passado. Dependendo da relação entre volume

total da cheia e capacidade de armazenamento do reservatório, as barragens de controle de cheias podem atrasar e/ou reduzir as vazões máximas a jusante.

Em situações em que o volume da cheia é pequeno comparado com a capacidade de armazenamento do reservatório, as vazões máximas a jusante da barragem podem ser muito menores do que seriam na ausência da barragem. Por outro lado, quando a capacidade do reservatório é pequena, ou se já está parcialmente cheio no início da cheia, o efeito de redução da vazão máxima é mínimo. Essa diferença de comportamento está ilustrada na Figura 3a. Quanto maior a cheia, menor é a eficácia da barragem de controle de cheias, conforme ilustrado na Figura 3b, sendo que para cheias extraordinárias o benefício da barragem é nulo.

É amplamente reconhecido que as barragens de controle de cheias têm efetividade em atenuar as pequenas cheias que ocorrem mais frequentemente, mas não permitem controlar as grandes cheias, que ocorrem mais raramente (Tucci, 2007). Apesar dessa deficiência, reservatórios de detenção ou, popularmente, piscinões, são muito utilizados para controle de cheias em pequenas bacias urbanas, sendo recomendados para compensar o aumento das cheias causado pela impermeabilização do solo, dentro do conceito de desenvolvimento urbano de baixo impacto (Canholi, 2005; Tucci, 2007).

No caso de enxurradas e inundações extremas em rios de médio e grande porte no Sul do Brasil, o volume de água é muito grande e é produzido de forma distribuída em uma grande área. Isso faz com que o tamanho dos reservatórios necessários para atenuar as cheias seja

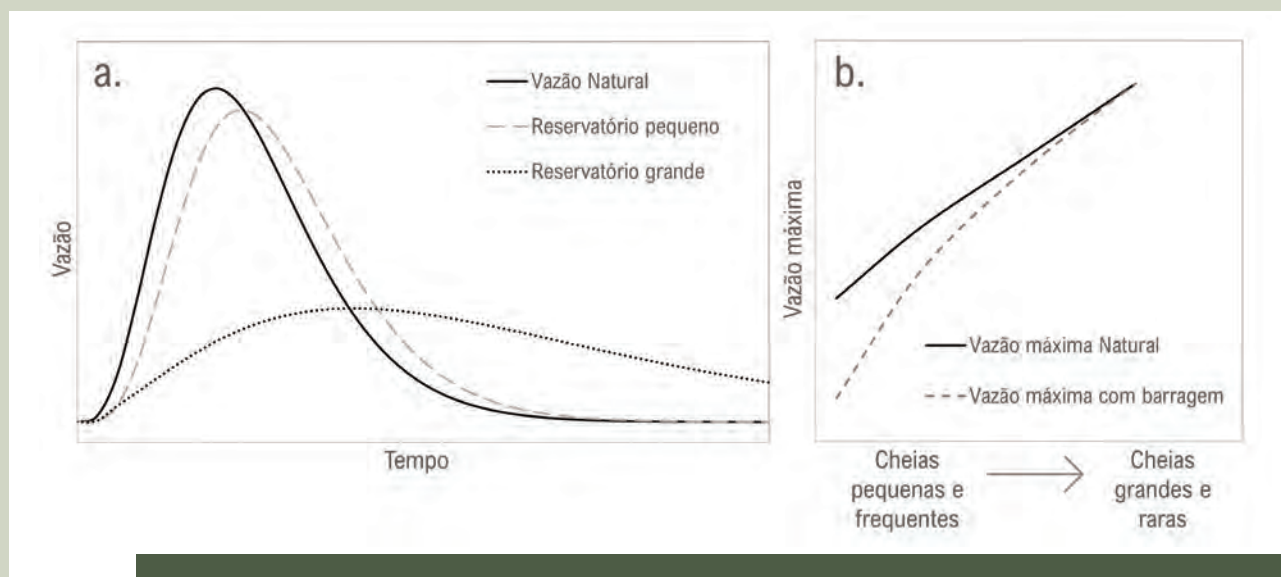


Figura 3. Efeito de barragens de controle de cheias sobre os hidrogramas e as vazões máximas. a) Ilustração do efeito sobre a vazão de um rio durante uma cheia mostrando a diferença entre o hidrograma natural (linha contínua), o hidrograma de saída de uma barragem com reservatório grande (linha pontilhada) e outra com reservatório pequeno (linha tracejada); b) Ilustração do efeito de redução de vazão máxima obtida pela existência de uma barragem em função da magnitude da cheia.

extremamente grande, com barragens muito altas e com reservatórios que inundam áreas muito extensas. Em consequência disso, há uma grande dificuldade em se encontrar locais adequados para a sua construção, especialmente quando são considerados os outros usos da terra e da água, como cidades, agricultura, usinas hidroelétricas, áreas de proteção ambiental, e infraestrutura já existente, como estradas e pontes.

Esta medida foi adotada na Bacia do Rio Itajaí-Açu, em Santa Catarina com a construção de três grandes barragens exclusivamente para controle de cheias (Pinheiro e Franck, 2003). Elas têm ajudado a reduzir as cheias pequenas e frequentes em cidades como Taió, Rio do Sul e Blumenau, mas não impedem, e nem chegam a atenuar, as cheias maiores. Recentemente, por exemplo, a cheia de novembro de 2023 desalojou cerca de 18 mil dos 73 mil habitantes de Rio do Sul, demonstrando que o risco de inundação permanece, apesar da presença das barragens (G1, 2023).

As opiniões favoráveis à construção de barragens frequentemente são reforçadas pelo argumento dos possíveis usos múltiplos dos reservatórios (Hunt *et al.*, 2024), que serviriam, ao mesmo tempo, para controlar cheias e prover água para o abastecimento, a irrigação ou geração de energia. Entretanto, reservatórios de controle de cheias devem ser utilizados exclusivamente para esse fim, pois sua utilização simultânea para outras finalidades resulta em conflitos entre os diferentes usos, e na redução da sua eficácia.

Idealmente, reservatórios de controle de cheias devem estar completamente vazios quando inicia uma cheia. Caso o reservatório já esteja parcialmente ocupado por água, parte da sua capacidade já terá sido ocupada, e ele se comportará como um reservatório de menor capacidade. Reservatórios plenamente preenchidos no início de uma cheia não têm

nenhum impacto na redução das vazões máximas. Considerando as características do clima do Rio Grande do Sul, onde chuvas intensas e cheias podem ocorrer praticamente em qualquer época do ano, reservatórios de controle de cheias deveriam ser mantidos vazios durante o ano inteiro. Assim, açudes e reservatórios construídos para prover água para irrigação de áreas agrícolas, que tipicamente precisam estar cheios quando se inicia o plantio, não funcionam adequadamente para controlar cheias.

Finalmente, é importante destacar que a construção de novas barragens cria áreas de risco adicionais associadas ao potencial rompimento durante um evento extremo, sendo necessária uma gestão adequada. A experiência com a cheia de abril e maio de 2024, em que a capacidade máxima de vazão foi superada em pelo menos quatro barragens de usinas hidrelétricas, e em que uma grande barragem sofreu um rompimento parcial (Collischonn *et al.*, 2025), sugere que a possibilidade de um rompimento de barragem é real e deve ser considerada com muita seriedade.

5.1.2. Retificação do leito, ampliação de canais e desvios de cursos d'água

Uma medida tradicional de controle de inundações é baseada na ideia de ampliar a capacidade de conduzir água do sistema de drenagem, o que pode ser obtido modificando o leito do rio por meio de obras como o aumento de sua largura ou pela retificação do leito, que consiste em escavar um novo leito para o rio com uma forma em planta retilínea, cortando as curvas dos meandros naturais. Com a retificação, se diminui o comprimento do rio e aumenta sua declividade, acelerando o escoamento.

A retificação e ampliação da largura e profundidade do leito têm sido, historicamente,



Fernando Mainardi Fan

Monitoramento hidrológico.

aplicadas em quase todos os pequenos rios urbanos do Brasil, como no Arroio Dilúvio, em Porto Alegre (Silva, 2019). Atualmente, essas medidas têm sido analisadas mais criticamente, porque tendem a reduzir cheias no local em que são implementadas, mas aumentam as inundações em locais situados a jusante (Tucci, 2007).

Desvios de rios foram sugeridos diversas vezes como forma de reduzir as cheias do Guaíba. Já após a cheia de 1941 havia a proposta de desviar o fluxo do Rio Jacuí diretamente para o Oceano Atlântico, invertendo o sentido

do fluxo no Rio Gravataí (DNOS, 1968). Mais recentemente, após a cheia de 2024, foram sugeridas medidas como a abertura de canais adicionais entre a Laguna dos Patos e o oceano, e a abertura de um canal de desvio entre o Jacuí e o Guaíba.

Teoricamente, essas medidas poderiam contribuir para a redução do nível d'água durante as cheias, entretanto elas podem desencadear outros problemas. Por exemplo, canais de desvio podem instabilizar a morfologia do leito do rio, exigindo dragagens cada vez mais frequentes e caras para continuar

operando de forma satisfatória. Um canal mal projetado pode assorear rapidamente e deixar de ser útil em poucos anos. Em um desfecho ainda pior, pode se alargar e aprofundar, erodindo as margens das áreas que deveriam ser protegidas, e resultando no assoreamento e abandono do leito original do rio.

As propostas de novas ligações entre a Laguna dos Patos e o oceano também têm um grande potencial de instabilidade morfológica, podendo fechar rapidamente por assoreamento, ou se ampliar de forma descontrolada por erosão. Além disso, novas ligações com o oceano podem resultar na entrada de água salgada na Laguna dos Patos, em regiões em que existem captações de água-doce para abastecimento ou irrigação, além de outros impactos ambientais.

Considerando que os impactos potenciais são grandes, e que, em estudos anteriores (DNOS, 1968; Laipelt *et al.*, 2025), foi demonstrado que os benefícios de canais de desvio em termos de redução do nível da água máximo durante as cheias do Guaíba são relativamente pequenos, entende-se que propostas desse tipo exigem análise cuidadosa, baseada em dados atualizados e mais detalhados do que os disponíveis atualmente.

5.1.3. Dragagem e desassoreamento

A dragagem é o processo de retirada de sedimentos, como areia e seixos, do leito do rio, com o objetivo de aumentar a sua profundidade ou mineração. A dragagem pode ser realizada em um rio natural, em trechos rasos, para permitir a navegação com embarcações que, de outra forma, ficariam encalhadas. Também pode ser executada com o objetivo de ampliar a capacidade de vazão do leito do rio. Além disso, pode ser feita para recolher a areia ou os seixos para uso comercial, na construção civil.

Em rios modificados por ação antrópica, que tenham sido alargados, retificados e canalizados, a dragagem pode ser necessária para evitar que os benefícios de redução das inundações obtidos pela canalização sejam anulados pelo assoreamento. Nesse caso, a dragagem é realizada visando ao desassoreamento, como ocorre de forma quase constante em rios urbanos altamente modificados, como o Arroio Dilúvio.

Em rios em condições mais naturais, sem profundas alterações antrópicas no leito ou na bacia, ocorre maior equilíbrio entre o aporte (vindo de montante) e a descarga (indo para jusante) dos sedimentos, e, por isso, os casos de assoreamento são menos comuns. Em geral esses rios não necessitam de dragagem para desassoreamento, embora para permitir a navegação a dragagem possa ser necessária. Isso não significa que em rios naturais as características morfológicas são estáticas, pois a alteração da paisagem, com a formação de bancos de areia, e a modificação de ilhas e margens é um fenômeno natural ligado ao ciclo hidrológico e processos de erosão das bacias e transporte e deposição de sedimentos nos rios.

O efeito potencial da dragagem nas cheias tende a ser de redução das inundações junto ao local dragado, mas o efeito real depende da geometria do leito do rio a jusante. Para que a dragagem seja efetiva em uma cidade, é necessário dragar o rio não apenas no local, mas ao longo de uma longa distância para jusante.

O efeito da dragagem sobre as cheias também depende da largura da faixa dragada. Por exemplo, a dragagem de uma faixa de 50 metros de largura em um rio de 500 metros de largura tem pouco efeito sobre as cheias. Assim, as dragagens de manutenção dos canais de navegação, que são tipicamente muito mais estreitos do que o leito do rio, têm pouco efeito em termos de redução de cheias.



Dragagem e desassoreamento no Arroio Dilúvio em Porto Alegre.

Então, para reduzir o impacto de grandes cheias em rios de médio e grande porte, o volume de sedimentos que deve ser removido por dragagem é extremamente elevado, o que resulta em custos altos. São necessários estudos topobatimétricos, hidrodinâmicos e hidrossedimentológicos detalhados para a que seja possível avaliar se a dragagem será efetiva, e para estimar os volumes de remoção necessários. Finalmente, dragar um rio para que seu leito tenha uma profundidade maior do que a apresentada na condição natural significa retirar o rio da sua condição de equilíbrio, e a tendência natural será de deposição de sedimentos nas partes dragadas do leito, voltando à condição original.

Por isso, para se manterem efetivas, as operações de dragagem não são definitivas, mas devem ser realizadas periodicamente, criando um custo repetido incessantemente. A dragagem deve ser executada com cuidado, pois pode ter efeitos negativos duradouros, como a desestabilização das margens, a supressão de ilhas e a perda de ecossistemas.

Assim como no caso de obras de retificação e de desvio, os impactos potenciais da dragagem são grandes e os benefícios podem não ser muito grandes. Os custos da dragagem são grandes e incessantes, pela necessidade de se fazer dragagens de manutenção.

5.1.4. Diques

Diques são barragens de terra ou concreto construídas a uma certa distância das margens, para impedir que as águas de inundação avancem sobre as áreas protegidas, reduzindo assim a extensão da área de inundação.

Uma das características fundamentais de um dique é sua cota de coroamento, que é, teoricamente, o maior nível da água para o qual o dique pode oferecer proteção. É definida a partir de estimativas de níveis máximos que poderão ocorrer no futuro, e que estão associados a uma probabilidade pequena, mas não nula, de serem superados.

Diques não podem ter grande altura a partir do solo, por isso seu uso é, em geral, limitado a regiões em que a elevação do nível da água durante a cheia é de poucos metros. Assim, embora Porto Alegre e outras cidades da região metropolitana tenham construído diques para proteger áreas baixas das inundações, em cidades localizadas ao longo dos vales dos Rios Caí e Taquari, onde o nível da água pode se elevar mais do que 10 metros durante uma cheia, esse tipo de solução nunca foi adotado.

A proteção contra inundações por meio de diques exige soluções especiais para a drenagem das águas pluviais que atingem diretamente a área protegida. Tipicamente são utilizadas redes de drenagem que conduzem as águas pluviais até casas de bombas, que permitem que a água da chuva seja bombeada para fora da área protegida.

Embora possam ser eficazes para impedir as inundações, os sistemas de diques podem falhar ou podem ser superados. Falhas podem acontecer em porções fragilizadas ou rebaixadas do dique, ou no sistema de drenagem de águas pluviais (casas de bombas).



A capacidade de proteção de um dique pode ser superada, caso ocorra uma cheia em que o nível máximo da água supere a cota de coroamento.

A construção de diques incentiva o desenvolvimento urbano na área protegida. Isso faz com que os danos e prejuízos potenciais em caso de falha da estrutura sejam muito maiores do que seriam, caso não houvesse dique. Essa situação contraditória, em que uma estrutura concebida para reduzir os danos das cheias pode ter o efeito de



Reforço nas comportas do Guaíba durante a enchente de 2024.

aumentá-los, é conhecida na literatura como “paradoxo do dique” (Di Baldassare *et al.*, 2018).

Na Europa e nos Estados Unidos os diques foram amplamente utilizados ao longo dos últimos séculos para proteger não somente áreas urbanas, como também extensas áreas rurais adjacentes aos rios. Essa generalização do uso de diques restringiu o espaço que poderia ser ocupado pela água durante as cheias. Como resultado, a água impedida de ocupar a várzea passou a escoar mais rapidamente para jusante,

resultando no aumento das vazões máximas e dos níveis máximos durante as cheias em trechos a jusante das áreas protegidas (Munoz *et al.*, 2018). Em alguns casos, os diques também podem restringir a zona de passagem de água, e a consequência é que o nível da água aumenta para uma mesma vazão em relação à situação em que não havia diques.

Em face a essas consequências não intencionais dos diques, em muitos casos atingindo regiões distantes dos locais efetivamente alterados (Ansari *et al.*, 2024), é importante ressaltar que a adoção desse tipo de solução deverá ser antecedida de estudos aprofundados, e com abrangência regional, pois a proteção com diques em um local poderá resultar em uma intensificação das cheias em outro local relativamente distante.

5.1.5. Considerações gerais sobre medidas estruturais

A efetividade das medidas estruturais depende das características locais, como topografia, hidrologia e grau de ocupação. A avaliação deve ser feita caso a caso e de forma integrada do nível local ao regional, uma vez que uma medida que reduz cheias em um local pode aumentar em outro. Devem ser desenvolvidos estudos hidrológicos, hidrodinâmicos e sedimentológicos, apoiados em mapeamentos, monitoramento *in situ* e modelagem computacional. Também devem ser avaliados impactos ambientais e econômicos, além do custo/benefício da medida.

As medidas estruturais na forma de obras de infraestrutura requerem elevada gestão para a manutenção e operação adequada, pois a sua falha pode causar grandes impactos negativos. Em todos os casos, por questões de viabilidade econômica e restrições físicas, as medidas estruturais são dimensionadas para um determinado nível de proteção associado a um

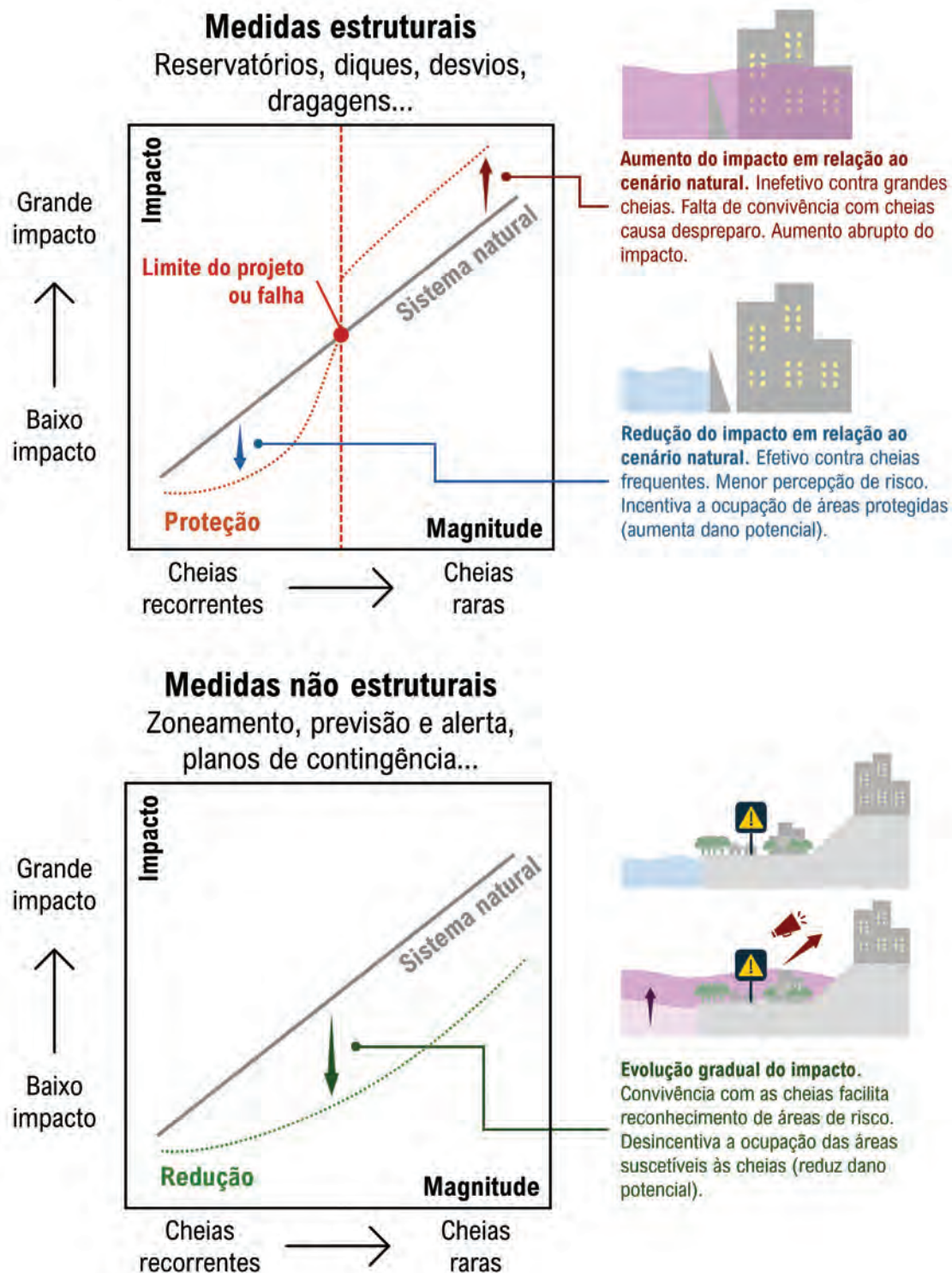


Figura 4. Representação conceitual dos impactos negativos de eventos de cheias recorrentes e os raros de maior magnitude e a redução ou aumento com medidas estruturais (obras de infraestrutura) ou medidas não estruturais (melhor convivência).

determinado risco, conforme ilustrado na Figura 4. Com isso, essas obras são capazes de reduzir as cheias pequenas e mais frequentes, mas não são capazes de proteger contra cheias extremas, que superam as expectativas do projeto.

Finalmente, a redução de cheias recorrentes de menor magnitude pode levar à diminuição da percepção de risco, o que invariavelmente conduz a população para a ocupação de áreas inundáveis, pela falsa sensação de segurança que a obra pode trazer. Quando da ocorrência de uma grande cheia e/ou falha/incapacidade da medida estrutural e seus gestores, a população é pega de surpresa, podendo ocorrer a amplificação dos impactos negativos das grandes cheias. Antes a área não fosse protegida, ela não teria sido ocupada, e a infraestrutura e as pessoas não estariam naquele local expostas àquele risco. Esse fenômeno foi observado durante o desastre de 2024 no RS.

5.2. Aprender a conviver com extremos hidrológicos traz a maior resiliência

Medidas não estruturais são abordagens que buscam reduzir os prejuízos causados pelas cheias, sem alterar o sistema hidrológico. Em outras palavras, essas medidas visam melhorar o convívio da sociedade com as cheias, reconhecendo que elas são um fenômeno natural, enquanto os desastres decorrem da forma como a sociedade se expõe ao perigo.

Medidas não estruturais têm a desvantagem de não eliminar os danos resultantes das cheias, mas têm a vantagem de envolver custos menores do que as medidas estruturais. Além disso, as medidas não estruturais tendem a reduzir prejuízos tanto de cheias pequenas como de cheias extremas, com maior garantia (Figura 4).

Essas soluções ainda não foram plenamente incorporadas no Sul do Brasil, havendo um

grande potencial para o aumento da resiliência aos eventos extremos e à mudança climática. As principais medidas não estruturais são descritas a seguir.

5.2.1. Mapeamento de áreas de risco

Uma medida não estrutural prioritária é o mapeamento adequado das áreas que podem ser inundadas durante as cheias. Esse mapeamento pode incluir ainda informações sobre a suscetibilidade a outros tipos de eventos hidrológicos, como enxurradas e movimentos de massa.

O mapeamento de suscetibilidade à inundação permite identificar e visualizar as áreas propensas a serem inundadas, representando espacialmente a linha d'água de uma cheia real ou hipotética em um mapa. Esse processo cruza informações sobre a altura da lâmina d'água com a topografia do terreno, e pode ser repetido para cheias de diferentes magnitudes, e de maior ou menor probabilidade de ocorrência. Além disso, dados relacionados à profundidade e à velocidade do fluxo d'água podem ser integrados à análise da área inundável, fornecendo maior compreensão sobre o potencial de danos associados a uma cheia específica. Esses mapas são ferramentas valiosas tanto no planejamento regional, auxiliando na definição de medidas de prevenção e proteção contra enchentes, quanto no planejamento urbano, contribuindo para o ordenamento do uso do solo, implementação de sistemas de seguros contra inundações ou desenvolvimento de sistemas de monitoramento e alerta para cheias (Larentis *et al.*, 2020).

No RS o mapeamento de áreas de risco vem sendo feito sistematicamente pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), mas ainda não cobre todas as cidades atingidas por inundações. Além disso, em função da carência de dados em alguns municípios, alguns dos mapeamentos já

realizados não têm a precisão necessária para estimar adequadamente os riscos em todas as partes da cidade, e em qualquer evento hidrológico.

A qualidade do mapeamento de áreas de risco é fortemente dependente da qualidade dos mapas de relevo disponíveis, e nem todos os municípios dispõem ainda de levantamentos topográficos detalhados.

5.2.2. Zoneamento

O zoneamento é a definição de regras para a ocupação das áreas potencialmente inundáveis, com o objetivo de diminuir os impactos das cheias. Áreas com menor ou maior risco podem ser destinadas a diferentes usos, por meio de instrumentos como os Planos Diretores Municipais.

O principal mérito do zoneamento é que minimiza o agravamento dos impactos negativos no futuro, embora não resolva problemas já consolidados. Embora diversos municípios do RS tenham um longo histórico de problemas de inundação, são poucos os que já implementaram alguma forma de zoneamento nos seus planos diretores de desenvolvimento (Larentis *et al.*, 2020). Em parte essa deficiência é causada pela carência de mapeamentos de áreas suscetíveis à inundação na escala e com a precisão adequada para o zoneamento. Uma discussão sobre as abordagens utilizadas em diversos países, mas com foco maior no RS, foi apresentado por Larentis *et al.* (2020), incluindo descrição das etapas necessárias para o zoneamento.

5.2.3. Planos de contingência

Plano de contingência contempla um conjunto de procedimentos e de ações para prevenir o desastre específico ou para atender emergência

dele decorrente, reduzindo riscos ou impactos negativos, incluindo aspectos como ações de evacuação e resgate, mitigação de impactos ambientais, assegurar abastecimento de água potável, salvaguardar o patrimônio cultural etc. Para orientar essas ações, é necessária a devida caracterização do potencial evento de cheia, incluindo aspectos como áreas potencialmente impactadas, profundidade da água e velocidade do escoamento, velocidade de subida das águas, tempos entre a chuva e a cheia, duração do evento etc. Pode incluir casos de cheias naturais ou as causadas por falhas na infraestrutura, como reservatórios ou sistemas de proteção contra cheias. Os planos de contingência devem incluir ações de treinamento dos agentes envolvidos, capacitação da população, a realização de simulados anuais, entre outras atividades. A Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334) já contempla um instrumento semelhante para o caso de cheias causadas pela ruptura de barragens, o Plano de Ações Emergenciais (PAE), que tem sido implementado em território nacional sob responsabilidade de cada empreendedor. Os planos de contingência também já são previstos na Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei 12.608), embora ainda se encontrem em menor grau de implementação.

5.2.4. Previsão e alerta de cheias

A tomada de decisão antes e durante uma cheia depende de previsões hidrológicas, que consistem em estimativas antecipadas do nível da água, ou da vazão dos rios. Essas estimativas indicarão, por exemplo, sobre a necessidade de evacuação de determinadas áreas da cidade que não estão protegidas por nenhuma medida estrutural. Também são essenciais para operar corretamente eventuais medidas estruturais (barragens e sistemas de diques com comportas). As previsões também poderão indicar a possibilidade de falha da medida

estrutural, por exemplo, se um dique será superado e quando.

Isso significa que antes ou concomitante a investimentos em estruturas ou novos planejamentos, é necessário o investimento em informações básicas que permitam saber o que está acontecendo com os rios durante uma cheia e nas próximas horas e dias.

Pesquisadores do SGB-CPRM – Serviço Geológico Brasileiro – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (Silva e Buffon, 2020) indicaram que a operação do Sace (Sist. de Alerta de Cheias) no Rio Caí evitou a perda de 112 reais para cada real investido. Esse valor de dano evitado em prevenção foi superior aos outros esperados a partir de medidas estruturais de mitigação de cheias na região. Outra pesquisa indicou uma economia de 18 a 41 reais para cada real investido em um sistema estadual de previsão (Nonnemacher e Fan, 2023).

Para previsões acuradas, além dos sistemas computacionais e matemáticos que efetuam os cálculos, são essenciais informações sobre o terreno, como topografia e batimetria dos rios, e monitoramento em tempo real de chuvas e níveis nos rios, através de uma rede hidrometeorológica operacional robusta. Observações de chuvas e vazões são disponibilizadas por intermédio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Todavia, deve-se buscar expandir a rede, cobrindo áreas mais extensas com maior densidade e lacunas de monitoramento. Uma medida simples seria a instalação de pelo menos um posto de medição de chuva automático em cada um dos municípios do estado. Em relação aos rios, é importante que, além da expansão e manutenção da rede, seja considerada a existência de duplicidade em locais estratégicos de monitoramento. Evitando, por exemplo, o que ocorreu com a

régua do Cais Mauá em Porto Alegre, que, no início da cheia de 2024, foi perdida, deixando a população e os tomadores de decisão sem informação em momentos críticos.

Finalmente, é importante ponderar que apenas tecnologias não fornecerão a solução. São necessárias pessoas qualificadas, especialistas em hidrologia e conhecedoras da região, que assumam a responsabilidade nos momentos de crise e garantam a perpetuidade dos sistemas e dados durante os períodos entre os desastres. Desta forma, sugere-se que, para configurar os primeiros passos rumo à adaptação do RS a mudanças climáticas, em especial aumento das cheias, os primeiros reais investidos devem ser em sistemas de previsão, dados e pessoas qualificadas em instituições responsáveis pelos serviços de hidrologia.

5.3. Soluções baseadas na natureza

A Soluções Baseadas na Natureza (SBN) buscam abordagens mais “naturais” para interferir nos processos hidrológicos na escala da bacia hidrográfica (Lane, 2017). SBN para problemas de inundação incluem abordagens para a redução da taxa de geração de escoamento rápido em encostas, o armazenamento de água durante as cheias dos rios, e a desconexão parcial entre fontes de escoamento e zonas de potencial inundação.

Considerando que as SBN envolvem modificações do sistema hidrológico, podem ser classificadas como medidas estruturais. No entanto, em geral as SBNs são aplicadas como forma de desfazer outras alterações antrópicas excessivas e reverter os seus impactos negativos.

Entre as SBNs estão a recomposição da vegetação nativa para favorecer a infiltração de água no solo, a restauração de pântanos ou



Reparo no dique da Mathias Velho em Canoas, RS, após a enchente.



Várzea do Jacuí

banhados para reter a água por mais tempo e diminuir as vazões máximas, a conservação dos solos em áreas agrícolas, a remoção de aterros e outros obstáculos artificiais na planície, a criação de áreas de armazenamento offline (afastadas dos rios), a relocação de diques em áreas rurais para permitir que as planícies sejam parcialmente inundadas e a reconexão de canais laterais de rios.

Em diferentes países, os conceitos de SBN passaram a fazer parte da abordagem principal para reduzir os impactos das cheias, tanto em áreas urbanas como rurais. Na Holanda os conceitos de SBN, juntamente com diversas medidas estruturais, são a base da abordagem “Room for the River”, que pode ser traduzida como “espaço para o rio” (Zevenbergen et al., 2015). Na China essa combinação de SBN e

medidas estruturais recebeu o nome de Cidade Esponja, e vem sendo aplicada com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico (Wang *et al.*, 2018). No Brasil conceitos semelhantes estabeleceram as bases da chamada Drenagem Urbana Sustentável, em que a ideia tradicional de escoar a água precipitada o mais rápido possível vem sendo substituída pelas ideias de favorecer a infiltração da água no solo, e de retardar o escoamento (Tucci, 2007; Canholi, 2005).

Tanto no ambiente urbano (Cidade Esponja e Drenagem Urbana Sustentável) como em ambiente rural (Room for the River), as abordagens das SBN têm sido mais utilizadas para reverter impactos negativos das alterações antrópicas do que em reduzir as cheias em grandes bacias rurais onde ainda não houve alterações profundas no sistema fluvial.

Além disso, a Drenagem Urbana Sustentável e a Cidade Esponja são estratégias focadas no ambiente urbano, em bacias hidrográficas relativamente pequenas, da ordem de dezena de quilômetros quadrados, e para diminuir o alagamento temporário pela falta de capacidade de drenagem da rede pluvial. Essas soluções tipicamente não servem para reduzir a inundação causada por rios de grandes bacias, que drenam milhares de quilômetros quadrados.

Na escala de bacias hidrográficas de grandes rios, medidas do tipo SBN, como a recomposição da vegetação natural na escala de bacia, podem contribuir para diminuir a magnitude de pequenas cheias e para reduzir a erosão dos solos, mas têm pouco ou nenhum efeito nas grandes inundações, em que a capacidade de armazenamento de água nos solos tende a ser superada pelos elevados volumes de chuva, de forma quase independente do tipo de vegetação (Bloschl, 2022).

Um serviço prestado pela natureza fundamental, e amplamente reconhecido nas diversas estratégias como Cidade Esponja e Room for the River, é o efeito atenuador das cheias exercido pelas planícies inundadas em áreas rurais. Na Europa e nos Estados Unidos esse serviço natural foi sendo perdido ao longo dos séculos, à medida em que eram construídos diques para proteger áreas urbanas e rurais das inundações, conforme mencionado no item 5.1. Nesses países atualmente há um esforço em desfazer impactos antrópicos anteriores, removendo diques ou afastando os diques do rio, permitindo que mais áreas rurais sejam inundadas. No RS esse serviço prestado pela natureza não chegou a ser perdido, porque não foram construídos diques em áreas rurais, e a planície adjacente aos rios permanece sendo inundada. Foi graças ao efeito atenuador da inundação das planícies ao longo dos Rios Taquari, Jacuí, Pardo, Vacacaí e outros que a cheia na RMPA se limitou a uma elevação de quatro a seis metros do nível da água (Collischonn *et al.*, 2025).

5.4. Reconstruir melhor

Já existe um consenso científico acerca da mudança climática e os tomadores de decisão parecem convencidos da necessidade de prevenção em relação aos desastres naturais e à necessidade de adaptação, como fica evidente pela instituição da Política Nacional de Mudança no Clima em 2009, pelo Relatório de Conjuntura de Mudanças Climáticas em Recursos Hídricos organizado pela ANA, e pela elaboração de planos de ação climática por municípios, entre outras iniciativas. Mas ainda é necessário o desenvolvimento de alternativas e soluções objetivas que facilitem a ação para a adaptação à mudança climática.

Nesse sentido, no caso do Rio Grande do Sul, em meados de maio já se iniciava o debate

em relação à reconstrução da infraestrutura afetada após a grande cheia. Entre os cientistas das universidades e técnicos da ANA, havia uma preocupação para se reconstruir melhor com maior resiliência, incorporando a adaptação à mudança climática. Para tanto, Paiva *et al.* (2024b) apresentaram nota técnica com critérios hidrológicos simples e objetivos para adaptação à mudança climática, relacionada a chuvas e cheias extremas, para aplicações em projetos de infraestrutura, mapeamento de áreas de risco e planejamento durante e após a recuperação dos desastres de 2023 e 2024 na região Sul do Brasil. Esses critérios foram reafirmados em nota pela ANA (ANA, 2024), foram incluídos nos termos de referência para a contratação de projetos para reconstrução das pontes estaduais destruídas e estão sendo incorporados em outras aplicações. No conhecimento dos autores, esse foi o primeiro documento propondo critérios hidrológicos objetivos para a adaptação a mudança climática no Brasil.

6. Considerações finais

A cheia de maio de 2024 no Rio Grande do Sul causou um desastre sem precedentes na história da região e do país. Embora episódios como esse tenham ocorrido no passado, a exemplo da grande cheia de 1941 e as recentes de 2023, esse tipo de evento parecia inimaginável para a grande parte da sociedade gaúcha, levando ao aumento da sua vulnerabilidade ao longo dos anos. Considerando o elevado impacto negativo causado por essas cheias extremas, mesmo que elas pareçam improváveis de ocorrer, o mais adequado é reconhecer o elevado risco e se antecipar, minimizando os danos potenciais e aumentando a capacidade de recuperação, tornando-se assim mais resiliente. As cheias extremas têm sido crescentes e mais frequentes do que o esperado. E o Sul do

Brasil é o local onde as projeções de mudança climática para as próximas décadas apontam para os maiores aumentos das cheias. Assim, medidas objetivas para a adaptação à mudança climática e aumento da resiliência a essas cheias extremas são prioridade.

A reconstrução da infraestrutura destruída em 2023/2024 e novos planejamentos devem buscar maior robustez considerando critérios hidrológicos atualizados com os maiores registros históricos e com as projeções dos efeitos da mudança climática. A capacidade de proteção e resposta a cheias existente, incluindo a infraestrutura de proteção contra cheias (e.g. sistema de diques e casas de bombas), deve ser recomposta imediatamente, considerando que novos eventos extremos podem ocorrer novamente no curto prazo.

Como alternativa para o aumento da resiliência no médio prazo, diferentes soluções devem ser avaliadas caso a caso. Mas, em geral, as medidas estruturais como obras de infraestrutura mostram-se incapazes de controlar totalmente as inundações e alagamentos extremos, e aprender a conviver com os eventos hidrometeorológicos extremos é a alternativa que pode trazer a maior resiliência para a sociedade. As medidas estruturais como diques, reservatórios e dragagem aumentam a falsa sensação de segurança e são mais custosas. Necessitam de manutenção e operação adequadas no longo prazo, mesmo em anos de cheias pequenas. Já as medidas não estruturais que buscam a cultura de prevenção, por meio do planejamento e adaptação, são, em geral, mais adequadas, pois elas dão preferência para a convivência com a natureza na forma de zoneamento e habitação resiliente. Elas incluem o mapeamento de áreas de risco, zoneamento do uso do solo, sistemas de previsão e alerta e planos de contingência.

Sistemas de previsão e alerta e planos de contingência são igualmente essenciais para o pleno aproveitamento das medidas estruturais. Por esses motivos, é recomendado que medidas não estruturais sejam aplicadas em seu máximo potencial antes da implementação de novas medidas estruturais. Entre as soluções baseadas na natureza, a de maior potencial é a manutenção das planícies de inundação e regiões de várzea como áreas para armazenamento das águas, atrasando e atenuando a cheia e diminuindo a exposição em áreas de risco.

Os investimentos prioritários devem ser em dados e informações básicos, incluindo os sistemas de monitoramento e de previsão hidrológica, além da capacitação e valorização de pessoas, e o fortalecimento e coordenação das instituições envolvidas em diferentes níveis.

Para a adaptação a esse novo cenário, é importante que a gestão de risco de desastres seja uma pauta prioritária da sociedade. Conforme IPH (2023), é necessário o desenvolvimento de uma cultura de prevenção e compreensão de riscos relativos a eventos extremos e desastres, com conscientização da população sobre o risco de inundações em áreas habitadas, e popularização das ferramentas de gestão de risco, como mapas de perigo e de áreas de autossalvamento, alertas, de maneira disseminada na população, e com inclusão desses elementos no currículo escolar de nível fundamental e médio.

A gestão de risco de desastres deve ser conduzida em tempo integral, de maneira contínua e proativa, e não de forma reativa somente durante ou logo após a ocorrência de desastres. Entre as fases da gestão de risco, a prevenção é a mais importante e a que costuma surtir maiores efeitos, sendo justamente a etapa que deve ser conduzida antes do desastre ocorrer.

¹ A fim de considerar as projeções mais atuais e suas incertezas, foram utilizados resultados de 28 modelos climáticos globais (GCMs) do CMIP6 usados no Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O modelo hidrológico MGB (Modelo de Grandes Bacias) foi utilizado para simular as vazões nos rios da América do Sul (Siqueira et al., 2018). Foi utilizado o cenário intermediário de emissões de gases de efeito estufa (SSP2-4.5), que considera níveis de emissão estáveis até 2050 e posterior diminuição até 2100. Para estimar os fatores de modificação da magnitude e da frequência de chuvas e vazões máximas, as projeções para o período futuro, considerando a janela temporal entre 2050 e 2100, foram comparadas com o período histórico, definido como a janela temporal entre 1965 e 2015.

Referências

- ANA. Diretrizes para a consideração de impactos da mudança climática na adaptação ao risco hidrológico de eventos extremos de máxima na região Sul do Brasil. Nota técnica nº 3/2024. Comuc/SHE. Brasília, 4 jun. 2024.
- ANSARI, A. H.; MEJIA, A.; CIBIN, R. Flood teleconnections from levees undermine disaster resilience. *NPJ Natural Hazards*, 1(1), 2024, p.2.
- ARIAS, P. A. et al. Technical summary. *Climate Change 2021: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021, p. 33-144. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>.
- BLÖSCHL, G. Three hypotheses on changing river flood hazards. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 2022, p. 5015-5033. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>.
- BRÊDA, J. P. I. et al. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, 619, 2023.
- CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CHAGAS, V. B.; CHAFFE, P. L.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, 13(1), 2022.
- COLLISCHONN, W. et al. Precipitation that led to the floods in South Brazil set a new record. *RBRH* 29, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420240088>
- COLLISCHONN, W. et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* – RBRH, 1, 2025.
- COPERNICUS. 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level global climate highlights 2024. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- DI BALDASSARRE, G. et al. Hess opinions: an interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 2018, p. 5629-5637.
- DNOS. *Estudo de viabilidade técnico-econômica das obras de defesa de Porto Alegre, Canoas e São Leopoldo contra inundações*. Porto Alegre: Ministério do Interior. Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1968.
- G1. *Rio do Sul, em SC, confirma 2ª maior enchente da história*. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2023/11/18/rio-do-sul-confirma-2a-maior-enchente-da-historia.ghtml>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- GUIMARAENS, R. A enchente de 41. Libretos. HUNT, J. D. et al. Role of pumped hydro storage plants for flood control. *Journal of Energy Storage*, 104, Porto Alegre, 2025.
- IPCC. *Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IPH. Nota sobre a cheia ocorrida nos dias 4 e 5 de setembro na Bacia do Rio Taquari-Antas. GOLDENFUM, J.A. et al. *Nota técnica*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2023.
- KUCHINSKI, V. *Análise de características das inundações no extremo Sul do Brasil*. Tese (Doutorado) – PPGRHSA, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 2024.
- LAIPELT, L. et al. Assessment and hydrodynamic scenarios of the unprecedented flooding event in South Brazil 2024. *Natural Hazards*, 2025.
- LARENTIS, D. G. et al. Procedimentos e critérios para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 17, e 13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/reg.a.v17e13>
- MALINOSKI, A.; GONZATTO, M.; LOPES, R. *A enchente de 24: a história da maior tragédia climática de Porto Alegre*. 1ed. Porto Alegre: BesouroBox, 2024.
- MIRANDA, A. E. Floods and extension plans: discourse and projects in Southern Brazil. HEIN, C. (Ed.). *International Planning History Society Proceedings*. 17thIPHS Conf. History-Urbanism-Resilience, v.2, 17-21 July, 2016, p.89.
- MONTANARI, A.; MERZ, B.; BLÖSCHL, G. Hess opinions: the sword of damocles of the impossible flood. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(12), 2024, p. 2603-2615. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-28-2603-2024>
- MUNOZ, S. E. et al. Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering. *Nature*, 556(7699), 2018, p. 95-98.
- NONNEMACHER, L. C.; FAN, F. M. Análise da viabilidade econômica da previsão de cheias no Rio Grande do Sul. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e 8, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/reg.a.v20e8>
- PAIVA, R. C. D. et al. *Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional*. Clima: impactos de mudanças climáticas em extremos de vazão (cheias e estiagens) – Relatório final. IPH-ANA-HGE-Clima-A3. Porto Alegre: UFRGS, IPH; Brasília: ANA, 2024.
- PAIVA, R. et al. *Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na região Sul do Brasil*. Nota técnica. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024.
- PETRY, I.; FAN, F.; WOOD, A. *The influence of El Niño patterns on floods in Southeastern South America: Agu* 2024. Washington, DC, 2024.
- PINHEIRO, A.; FRANK, B. Obras de controle de cheias. FRANK, B.; PINHEIRO, A. *Enchentes na Bacia do Itajaí: 20 anos de experiência*, cap. 7. Blumenau: Edifurb, 2003, p. 143-172.
- SILVA, K. M. P. D. *Análise da morfologia original do arroio dilúvio, município de Porto Alegre, RS*. Porto Alegre, 2019.
- SILVA, E. D.; BUFFON, F. T. *Avaliação econômica da operação do sistema de alerta hidrológico da Bacia do Rio Caí entre os anos de 2009 e 2020*. II Encontro Nacional de Desastres, 2020, Rio de Janeiro. II END – Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro. Porto Alegre: ABRHidro, 2020.
- SIQUEIRA, V. A. et al. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 2018, p. 4815-4842. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

- SOARES, P. R. R.; FEDOZZI, L. J. Porto Alegre e sua região metropolitana no contexto das contradições da metropolização brasileira contemporânea. *Sociologias*, v. 18, n. 42, maio-ago. 2016, p. 248-281. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/15174522-018004206>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- TALEB, N. N. *A lógica do cisne negro: o impacto do altamente improvável*. Trad. Renato Marques de oliveira. 1 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Objetiva, 2021.
- TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: ABRH, 2007.
- WANG, H. et al. A new strategy for integrated urban water management in China: sponge city. *Science China Technological Sciences*, 61, 2018, p. 317-329.
- WMO. *El Niño weakens but impacts continue*. WMO, 2024. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/el-nino-weakens-impacts-continue>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- ZEVENBERGEN, C. Room for the river: a stepping stone in adaptive delta management. *International Journal of Water Governance*, 3(3), 2015, p. 121-140.

Equipe de trabalho

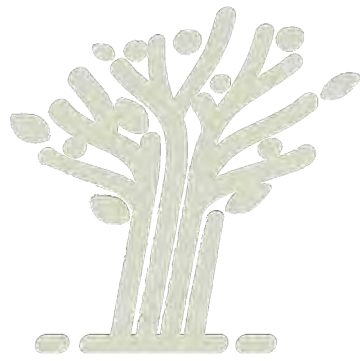
Fernando Mainardi Fan
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Anderson Ruhoff
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

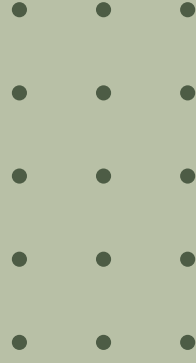
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Walter Collischonn
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pedro Torres Miranda
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Doutorando no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul



RS: RESILIÊNCIA & SUSTENTABILIDADE





Lucas Leffa/Secom-PR

PROMOÇÃO



FESPSP

A Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo – FESPSP

é reconhecida também por sua capacidade de realização de projetos, com centenas de trabalhos para a iniciativa pública e privada em todo o Brasil. Em sintonia com os nossos cursos, auxiliamos governos a formular políticas públicas mais bem conectadas aos problemas e demandas da sociedade, garantindo resultados de alto impacto social e uma gestão pública mais austera, eficiente, transparente e moderna. Dessa forma, com um pé no ensino e outro na prática, construímos nossa rica história contribuindo de forma concreta para um país melhor e mais justo.

SECRETARIA PARA
APOIO À RECONSTRUÇÃO DO
RIO GRANDE DO SUL



A Secretaria Extraordinária para Apoio à Reconstrução do

Rio Grande do Sul – Sers, foi constituída para dar continuidade ao trabalho do Ministério da Reconstrução, criado pelo Governo Federal para coordenar as políticas públicas que foram desenvolvidas em apoio e suporte à reconstrução do Rio Grande do Sul após o evento climático extremo que o estado sofreu entre abril e maio de 2024.

Além das várias políticas que articula em apoio às famílias, empresas e instituições de governo atingidas, a Sers desenvolve esse projeto de subsídio a pesquisas com o objetivo de indicar caminhos para aumentar a resiliência e a sustentabilidade das práticas econômicas, sociais e de estruturação urbana no estado mais meridional do Brasil.

APOIO

OPEN SOCIETY FOUNDATIONS

A Open Society Foundations é a maior financiadora privada do mundo de grupos independentes que trabalham pela justiça, pela governança democrática e pelos direitos humanos. Para cumprir essa missão, guia-se por princípios de justiça, igualdade e liberdade de expressão, que são características inerentes a qualquer sociedade verdadeiramente aberta.



RS: Resiliência & Sustentabilidade

REFLEXÕES PARA A RECONSTRUÇÃO DO RIO GRANDE DO SUL

Organizadores:

João Ferrer
Marcelo Danéris
Pedro Romero Marques

Editora: Libretos

Projeto gráfico e edição de arte: Patativa Letra e Arte

Revisão: Beto Arreguy

Impressão: Gráfica Pallotti

Grafia atualizada segundo o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, que entrou em vigor no Brasil em 2009.

Dados Internacionais de Publicação na Catalogação
Bibliotecária-documentalista
Daiane Schramm CRB-10/1881

R429 RS: resiliência & sustentabilidade – reflexões para a reconstrução do Rio Grande do Sul. 2.ed. revisada e ampliada. / Organizado por João Ferrer, Marcelo Danéris e Pedro Romero Marques. – Porto Alegre: Libretos, 2025.
324p. (Livro digital)

ISBN 978-85-5549-075-0

1. Meio Ambiente. 2. Sustentabilidade. 3. Mudanças climáticas. 4. Enchente. 5. Políticas de proteção. I. Ferrer, João. II. Danéris, Marcelo. III. Romero, Pedro.

CDD 363.7
CDU 502

Catálogo sistemático
Sustentabilidade: CDD 304.2
Mudanças climáticas: CDD 551.6

Todos os direitos desta edição reservados à

Libretos

Rua Peri Machado, 222, Bloco B, 707
Menino Deus, Porto Alegre, RS
CEP 90130-130

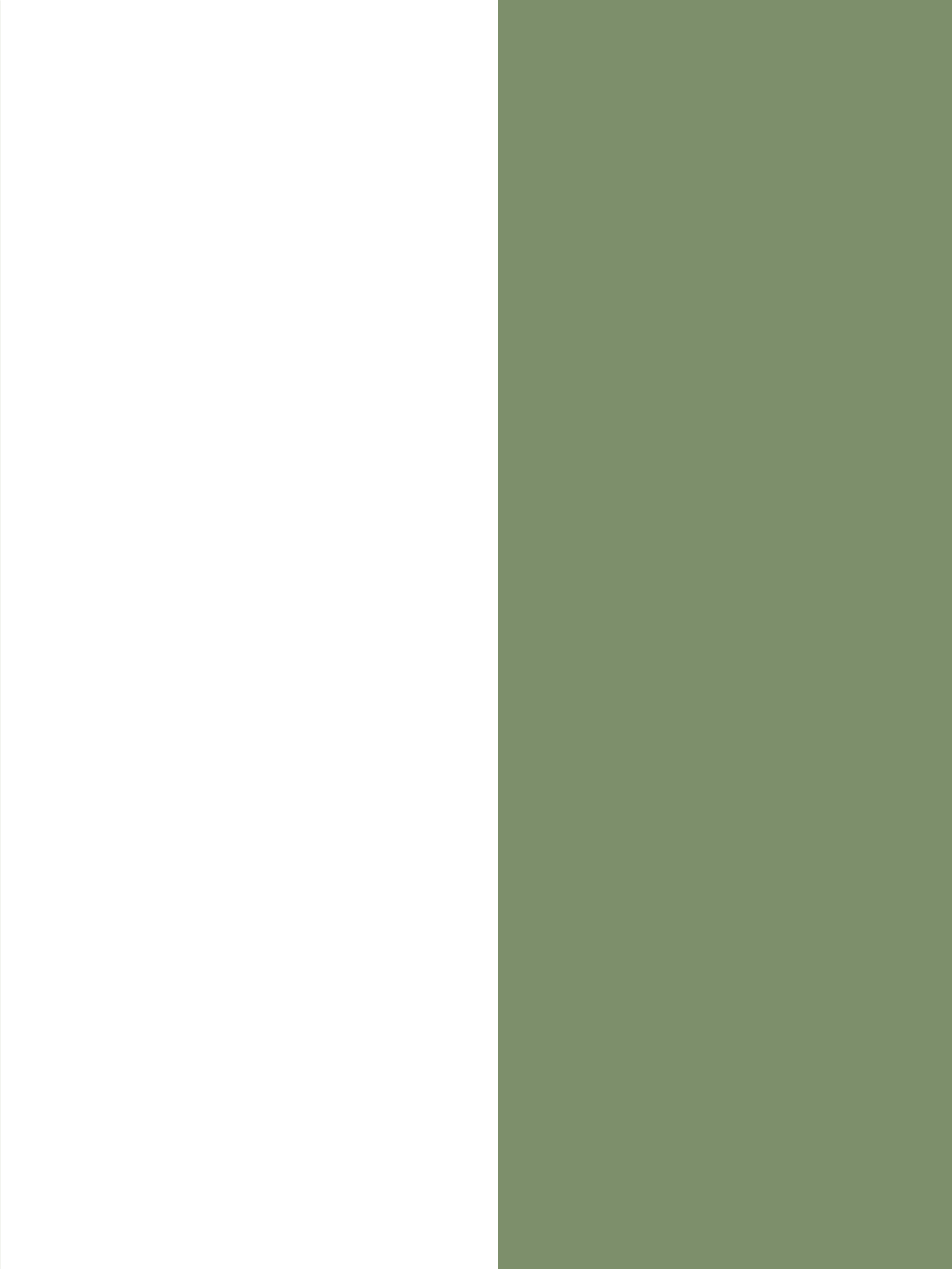
libretos@libretos.com.br
www.libretos.com.br
@libretoseditora

RS Resiliência & Sustentabilidade

REFLEXÕES PARA A RECONSTRUÇÃO
DO RIO GRANDE DO SUL

Livro composto em Exo 2, com 296 páginas,
impresso em papel couché 115 gramas,
pela gráfica Pallotti, em Santa Maria/RS,
em fevereiro de 2025.
Distribuição gratuita.







APOIO

**OPEN SOCIETY
FOUNDATIONS**



SECRETARIA PARA
APOIO À RECONSTRUÇÃO DO
RIO GRANDE DO SUL

