

Mudanças climáticas

O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024

*JOSÉ A. MARENGO,^I GIOVANNI DOLIF,^{II}
ADRIANA CUARTAS,^{III} PEDRO CAMARINHA,^{IV}
DEMerval GONÇALVES,^V RAFAEL LUIZ,^{VI} LARISSA SILVA,^{VII}
REGINA C. S. ALVALA,^{VIII} MARCELO E. SELUCHII,^{IX}
OSVALDO L. MORAES,^X WAGNER R. SOARES^{XI}
e CARLOS A. NOBRE^{XII}*

Introdução

AS INUNDAÇÕES são os desastres naturais mais mortais, atingindo inúmeras regiões do mundo todos os anos, e a crescente pressão populacional, a degradação dos ecossistemas e a variabilidade e alterações climáticas contribuem para um aumento adicional dos riscos relacionados. Entre 1998-2017, as inundações afetaram mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo (UNISDR, 2017).

Dados analisados pela Confederação Nacional de Municípios CNM (2024) apontam que 93% dos municípios brasileiros foram atingidos por algum desastre natural que levou ao registro de emergência ou estado de calamidade pública, especialmente por tempestades, inundações, enxurradas ou alagamentos nos últimos dez anos. No período de 2013 a 2022, mais de 2,2 milhões de moradias foram danificadas em todo o país por causa desses eventos, afetando diretamente mais de 4,2 milhões de pessoas, que tiveram de deixar suas casas em 2.640 cidades do país. As enchentes e inundações têm sido recorrentes no Brasil devido a questões naturais, sociais e climáticas. Os municípios da região Sul do Brasil somam o maior percentual de casas afetadas (46,79%), sendo 1 milhão de locais danificados e 54.559, destruídos, representando prejuízo financeiro de cerca de R\$ 4 bilhões – 15,22% do total. Os prejuízos econômicos causados pelas chuvas no Brasil já geraram prejuízos de R\$ 55,5 bilhões entre 1º de outubro de 2017 e 17 de janeiro de 2022, segundo estudo da CNM (2022).

O Rio Grande do Sul tem sido afetado por temporais desde o final do mês de abril de 2024, e que se intensificaram nos primeiros dias do mês de maio,

deflagrando inundações que afetaram boa parte do estado, incluindo a capital, Porto Alegre. As cataratas do Iguazu tiveram vazão de 8,3 milhões de litros por segundo no dia 4 de maio. Em média, a vazão é de 1,5 milhão de litros por segundo (UOL, 2024b). Mudanças na circulação atmosférica associada ao fenômeno El Niño que ainda está agindo sobre o Brasil também contribuíram para a estacionariedade das frentes frias e consequentes altos volumes de chuva no estado.

As chuvas abundantes e persistentes deflagraram inundações em várias cidades do Rio Grande do Sul. Os rios Taquari, Cai, dos Sinos e das Antas aumentaram os seus níveis em vários metros, inundando cidades e impactando as populações, o que gerou uma onda que elevou em mais de 5 m o nível do Lago Guaíba, que por sua vez inundou vários bairros de Porto Alegre, culminando na considerada pior enchente histórica que afetou o estado, ultrapassando o extremo de 1941 quando o Rio Guaíba atingiu a marca de 4,76 metros no dia 8 de maio. No dia 5 de maio de 2024, essa marca foi superada e o Guaíba atingiu 5,35 metros.

O presente estudo avalia as condições meteorológicas, climáticas e hidrológicas durante as inundações que afetaram o Rio Grande do Sul desde o final de abril até meados de maio de 2024. Diferente de outros desastres que afetaram um único município, como o que ocorreu em São Sebastião no Litoral Norte de São Paulo, as inundações no Rio Grande do Sul afetaram centenas de cidades do estado. Também se avaliam os aspectos de monitoramento e alertas de risco de desastres hidrológico e geológico do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) no nível estadual necessário, assim como a declaração de estado de emergência consequente de alertas.

Histórico de desastres no Rio Grande do Sul

Até maio de 2024, a pior enchente que havia atingido Porto Alegre ocorreu em 1941, entre os meses de abril e maio. Segundo registros da época, a cidade recebeu chuva por 24 dias ininterruptas e o nível do Guaíba chegou a 4,75 metros, enquanto outras publicações falam em 4,76 metros. Silveira (2020) fez um levantamento da precipitação registrada em cidades gaúchas entre 13 de abril e 6 de maio de 1941: Bento Gonçalves com 423 mm; Caxias do Sul com 534 mm; Lajeado com 578 mm; Passo Fundo com 416 mm; Porto Alegre com 602 mm; e Santa Maria com 829 mm. O ano 1941 esteve associado a um episódio El Niño forte (Valente, 2018). Nesse episódio cerca de 70 mil pessoas ficaram desabrigadas, o que equivale a cerca de um quarto da população da época. Segundo registros, um terço dos estabelecimentos comerciais ficou embaixo d'água por cerca de 40 dias. Depois de a capital gaúcha ter sido castigada pela cheia de 1941, veio à tona o debate em torno da necessidade de se construir uma barreira que protegesse a cidade contra enchentes.

As enchentes no Rio Grande do Sul em setembro de 1959 causaram pelo menos 94 mortes. Essas enchentes ocorreram no Rio Pardo durante o mês de

setembro e atingiram especialmente os municípios na região do Vale do Rio Pardo (Pont, 2023). Em maio de 1967, o nível do Guaíba se encontrava acima da cota normal, marcando 3,13 m no dia 8 (Silveira, 2020). Posteriormente a esse evento foi criado o Sistema de Proteção Contra Cheias. Inaugurado em 1970, esse sistema é composto de muros, bombas e diques espalhados por dezenas de quilômetros para mitigar os impactos das cheias. O ano 1967 foi de neutralidade do fenômeno El Niño (Valente, 2018). Entre 3 e 5 de janeiro de 2010 ocorreu um importante desastre hidrológico na porção central do Rio Grande do Sul, onde dezenas de municípios apresentaram danos humanos, materiais e prejuízos. A precipitação intensa e volumosa desencadeou uma série de processos hidrogeológicos, como deslizamentos, enxurradas e inundações, conforme as particularidades de cada local atingido.

Em junho de 2023, a passagem de um ciclone extratropical sobre o estado provocou chuvas tão intensas que pessoas chegaram a morrer afogadas dentro de casa pela subida repentina do nível dos rios. Houve 16 mortos, além de 7,5 mil desabrigados ou desalojados em mais de 40 cidades na Região Metropolitana de Porto Alegre, no litoral norte do estado e na Serra Gaúcha (DW, 2023). No episódio que ocorreu entre 1 e 4 de setembro de 2023 as chuvas extremas afetaram mais de 400 mil pessoas. Nesse episódio, um sistema frontal estacionário que foi exacerbado por uma área de baixa pressão em níveis superiores da atmosfera causou chuvas e inundações sem precedentes no Vale do Taquari, especialmente nos municípios de Muçum e Roca Sales. Atribuídos ao El Niño de 2023, esse evento resultou em chuvas fortes que excederam os níveis normais em 200-300 mm, levando a inundações que afetaram 107 municípios, resultando em 53 mortes e extensos danos materiais. As bacias dos rios Caí e Taquari-Antas foram particularmente afetadas, com os níveis dos rios ultrapassando limites críticos, causando graves inundações e a maioria das mortes (Alvala et al., 2024). Em novembro de 2023 (DW, 2023), chuvas mais brandas nas regiões do Rio Taquari, Serra Gaúcha e Região Metropolitana de Porto Alegre provocaram a morte de 8 pessoas e forçaram outras 28 mil a sair de suas casas. Em 2024, segundo o Inmet, a forte chuva que atingiu o estado em 16 de janeiro deixou um rastro de destruição em 49 cidades. Em apenas uma hora, Porto Alegre registrou 76 milímetros de chuva, mais da metade da média prevista para janeiro (110 milímetros).

Características meteorológicas do desastre de maio de 2024

Circulação atmosférica

As fontes de chuva na região Sul do Brasil são especialmente frentes frias e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (Velasco; Fritsch, 1987; Satyamurty et al., 1998). Os ciclones extratropicais que se aproximam da América do Sul vindos do Oeste movem-se para Leste-Sudeste após cruzarem os Andes, enquanto as frentes frias associadas movem-se para Norte-Nordeste, produzindo atividade convectiva no sul do Brasil e mais ao norte (Kousky; Cavalcanti, 1984).

O ar que chegou ao sul do Brasil em abril-maio de 2024, levando umidade para um extraordinário volume de chuva, passou antes sobre o Oceano Atlântico tropical, onde a temperatura da água está bem acima da média (Figura 1a). Esse ar recebeu então calor e umidade da água do mar (Figura 1b). Ele entrou no Brasil pelo litoral das regiões Norte e Nordeste avançando país adentro até encontrar o paredão formado pela Cordilheira dos Andes. Ao ser comprimido pela elevada topografia, o vento desvia e acelera em direção à região Sul (Figura 1c). Ao chegar no Sul, esse ar quente e úmido encontra ar mais frio que serve como rampa, forçando o ar quente e úmido a subir e formar nuvens de tempestade (Figura 1d). Esse processo já é bem conhecido e acontece com frequência naquela região. No entanto, ele permaneceu atuando por muito mais tempo do que o normal.

Um bloqueio do escoamento atmosférico foi observado no Oceano Pacífico Sul, o que dificultava a formação de ondas na atmosfera que empurrariam o ar frio para o norte, interrompendo o processo. Esse bloqueio aparece como uma grande área em vermelho na Figura 1c, no canto inferior esquerdo. Por outro lado, na alta atmosfera, a cerca de 10 km de altura, uma outra anomalia estava em curso. Ventos muito fortes, chamados de corrente de jato (Figura 1e). Essa corrente de jato costuma estar mais intensa em períodos de El Niño que estava presente ainda que já em fase de enfraquecimento.

Identificou-se, portanto, que o evento extremo resultou da combinação de quatro fatores:

1 Um processo conhecido como rios voadores em que os ventos alísios de leste no oceano Atlântico Tropical passam sobre a Amazônia. Esse fluxo adquire maior quantidade de umidade devido a evapotranspiração da floresta e sofre um desvio e acelera devido a barreira topográfica dos Andes transportando grande quantidade de umidade na baixa atmosfera em direção ao sul do Brasil;

2 Ar mais quente e mais úmido do que o normal por causa do oceano Atlântico Tropical mais quente;

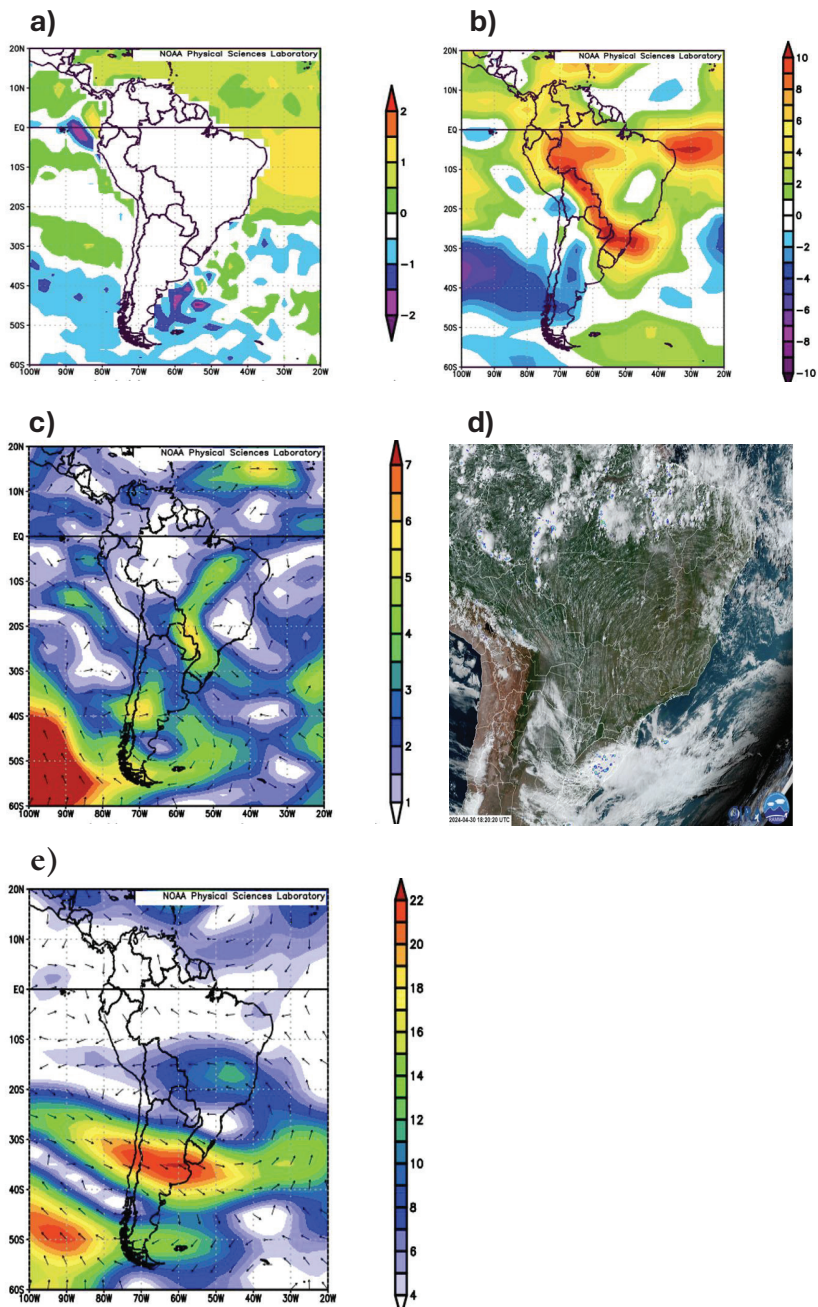
3 Um bloqueio atmosférico no Oceano Pacífico Sul;

4 El Niño, ainda que em fase de enfraquecimento.

Essa combinação permitiu que uma sequência de tempestades, durante dias, despejasse uma quantidade extraordinária de água sobre uma extensa área do estado do Rio Grande do Sul.

Precipitação

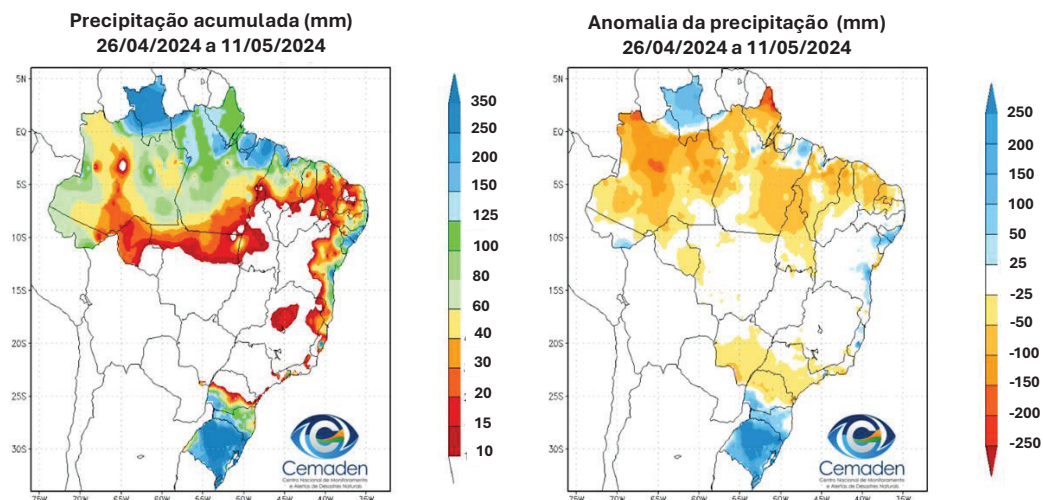
Maio de 2024 foi o mês mais chuvoso no Rio Grande do Sul desde 1910. Antes, setembro de 2023 era o mês com maior acumulado de chuva, 447,3 mm; seguido de maio de 1941, 405,5 mm; junho de 1944, 403,6 mm; abril de 1941 com 386,6 mm; e junho de 1982 com 365,6 mm. O número representa 34% da média anual de chuva na capital gaúcha (1991-2020), de 1494,6 mm. Considerando o mesmo período, esse montante de chuva é 455% da precipitação média mensal, de 112,8 mm.



Fonte: GOES-16, CSU/CIRA & NOAA; e) Anomalia de vento no nível de pressão de 250 hPa (aproximadamente 10 km de altura). Fonte de a), b), c), e) Reanálises do NCEP/NCAR.

Figura 1 – a) Anomalia de temperatura da superfície do mar entre os dias 15 de abril e 5 de maio; b) Anomalia de vapor de água na atmosfera entre os dias 15 de abril e 5 de maio; c) Anomalia de vento no nível de pressão de 850 hPa (equivalente a aproximadamente 1,5 km de altura) entre os dias 15 de abril e 5 de maio; d) Imagem de satélite da tarde do dia 30 de abril (15h20 horário de Brasília). As cores indicam quantidade de relâmpagos, ou seja, presença de tempestades.

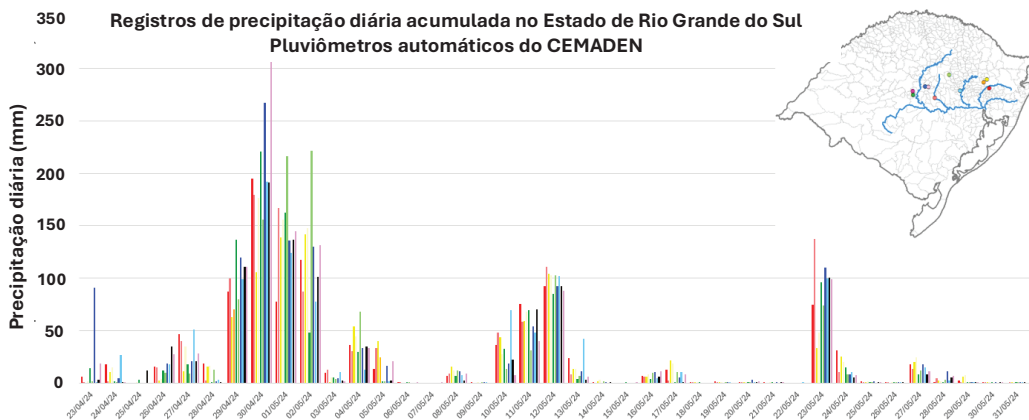
A chuva acumulada até 29 maio 2024 em Porto Alegre alcançou a marca de 513,6 (UOL, 2024b). As chuvas começaram na madrugada de 26 abril (sul do estado) com 9 dias de chuva ininterrupta e acumulados entre 300 e 600 mm entre 29 abril e 3 maio retornando no dia 11 de maio. A Figura 2 mostra que no Rio Grande do Sul chuvas nesse período foram de 250 mm acima da média de maio.



Fonte: Cemaden.

Figura 2 – Chuvas registradas entre 26 abril e 11 de maio (esquerda) e anomalias de chuva no mesmo período.

Os dados de precipitação de algumas estações da Rede de Observação Ambiental Cemaden (Alcântara et al., 2023; Marengo et al., 2023a, b; Moraes, 2023) no Rio Grande do Sul aparecem na Figura 3 para o período de 23 abril até 13 maio 2024). A Figura 4 mostra que as chuvas na bacia do Lago Guaíba, que inclui os rios das Antas, Jacuí e Cai, entre 200 e 300 mm no período de chuva mais abundante entre 29 de abril e 3 de maio. As maiores chuvas ocorreram na bacia do Guaíba entre os dias 30 de abril e 1º de maio, com estações apresentando mais de 300 mm/dia. Essas chuvas abundantes deflagraram as inundações no Guaíba que começaram 2 de maio e que chegaram ao pico de 5,35 m no dia 5 de maio. Nos dias 10 a 13 de maio choveu até 100 mm/dia, particularmente no dia 12 de maio e após as chuvas, o nível do Guaíba chegou a 5,20 m no dia 14 de maio. Nos dias 23-24 de maio choveu até 100 mm/dia e o Guaíba alcançou 4,30 m no dia 25 de maio (ANA, 2024).

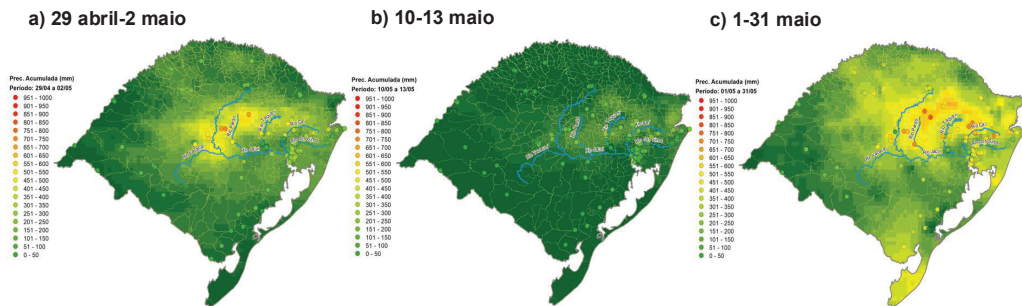


Fonte: Cemaden.

Figura 3 – Variabilidade diária da chuva entre 23 abril e 31 maio 2024. Estações são da Rede do Cemaden e as cores das barras identificam as estações marcadas com círculos no mapa da parte superior direita do painel.

A Figura 4 mostra os acumulados de chuva em dois períodos de chuvas abundantes observados entre 29 de abril até 2 de maio e 10 de maio até 13 de maio e o acumulado no mês de maio 2024. No primeiro período ocorreram acumulados da ordem de 600-700 mm sobre região das bacias dos rios Taquari, Cai e Pardo que fazem parte da bacia do Guaíba, e que geraram grandes volumes de chuva que alimentaram o Guaíba e deflagraram a inundação a partir do dia 2 de maio que chegou ao pico no dia 5. Esse volume de chuva foi o que mais contribuiu para o total mensal em maio. No segundo período chuvoso, 10-13 de maio o acumulado nessa região e sobre Porto Alegre chegou a 200-300 mm e como consequência o Guaíba ultrapassou novamente a cota de inundação, porém com valores menores que no dia 5 de maio. Os acumulados de chuva no mês de maio ultrapassaram os 700 mm sobre a bacia do Guaíba. Além dos dados de chuva das estações do Cemaden, também foram usados dados de chuva do Merge (Rozante et al., 2010). O Merge é um produto operacional do CPTEC/Inpe com abrangência para o continente sul-americano construído a partir da combinação da estimativa de precipitação por satélite (TRMM) e de dados observados de precipitação por pluviômetros. Os dados são disponibilizados diariamente em formato de imagem com resolução espacial de 0,1 grau com a representação dos milímetros de precipitação pluviométrica acumulados nas últimas 24 horas.

Segundo o INMET, no período de 26 de abril até 5 de maio de 2024 choveu um acumulado de 533,3 mm em Santa Maria (climatologia de maio: 151,1 mm), 430,7 mm em Caxias do Sul (climatologia: 133,6 mm), 418,2 mm em Porto Alegre (climatologia: 114,4 mm), 299,4 mm em Passo Fundo (climatologia: 140,2 mm) e 162,4 mm em Pelotas (climatologia: 111,1 mm).



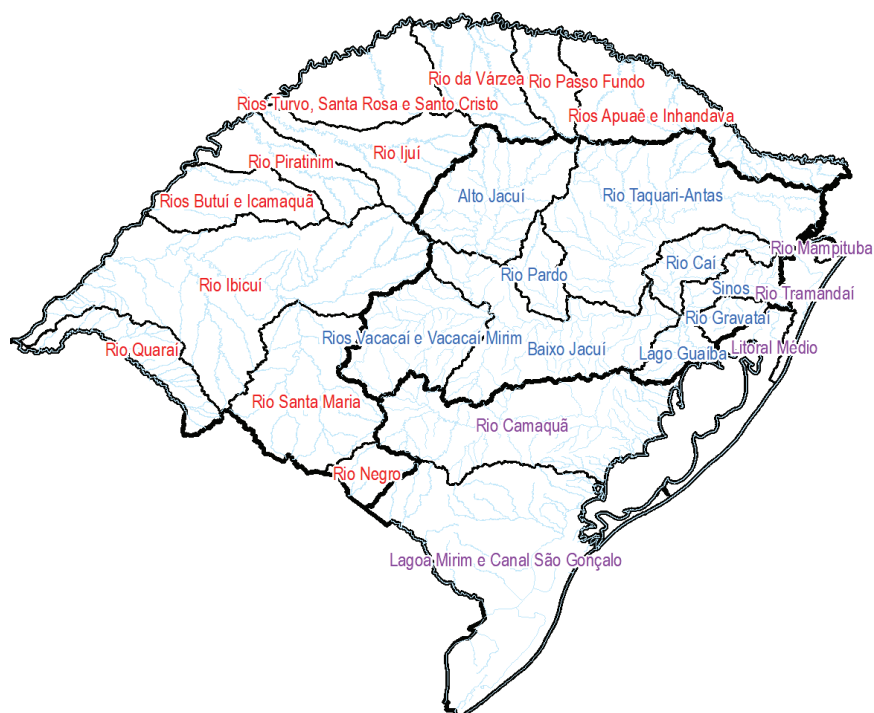
Fonte: Cemaden.

Figura 4 – Chuva acumulada entre 29 de abril – 2 de maio, entre 10-13 de maio 2024 no estado de Rio Grande do Sul, e acumulado de maio 2024. Os dados são do Merge. Estações são da Rede do Cemaden e círculos com cores identificam os acumulados de chuva em cada estação. A escala de cores aparece na parte esquerda de cada mapa.

Características hidrológicas do desastre de maio de 2024

O território do Rio Grande do Sul é dividido em três grandes bacias hidrográficas: i) a do Rio Uruguai, com área de 126.570 km², está inserida na bacia hidrográfica nacional do rio Uruguai; ii) a do Guaíba, com área de 85.279 km²; iii) e a Litorânea, com área de 59.249 km² (Tabela 1), essas duas últimas estão inseridas na bacia hidrográfica nacional do Atlântico – Trecho Sudeste (Figura 5). O Decreto n.53.885, de 18 de janeiro de 2018, instituiu a subdivisão das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul em 25 Bacias Hidrográficas,¹ sendo 9 na região hidrográfica da bacia do Guaíba, 4 na região hidrográfica das bacias litorâneas e 12 na Bacia do Rio Uruguai (Figura 6). Todas as regiões hidrográficas do estado foram atingidas com grandes acumulados de chuvas (Figura 5), resultando em severas inundações, enxurradas e movimentos de massa, com maior impacto nas bacias da região hidrográfica do Guaíba, área com maior população em áreas urbanas (Tabela 1). Para avaliar a magnitude das inundações foram selecionadas 6 estações hidrológicas que registraram o pico das cheias (Figura 5 e Tabela 2), devido ao fato de diversas estações pararem de funcionar antes de registrarem o pico do evento. O nível do Rio Taquari em Muçum atingiu o nível máximo de 25,57 m em 2 de maio, 9,57 m acima da cota de inundação (16,0 m), e somente 0,4 m abaixo do pico histórico registrado em 4 de setembro de 2023 (26 m). O pico da cheia de maio de 2024 foi equivalente a um período de retorno de 100 anos. O Rio Caí atingiu o nível máximo de 17,45 m no dia 2 de maio, 7,45 m acima da cota de inundação (10,0 m), equivalente a 155 anos de período de retorno. Na sequência, o Rio Sinos atingiu o nível máximo no dia 4 de maio, com pico de 8,11 m, 4,16 m. Já o Rio Jacuí (no Baixo Jacuí) e a região do Guaíba atingiram o nível máximo no dia 5 de maio, ambos atingindo cotas históricas equivalentes a 20,4m e 5,15m. Ressalta-se que a estação Cais do Mauá C6 (Tabela 2) ultrapassou o recorde histórico registrado

em 1941 (4,76 m), chegando ao valor de 5,33 m, 2,33 m acima da cota de inundação. Finalmente o Rio Gravataí, na estação Passo das Canoas, atingiu a cota máxima no dia 6 de maio, atingindo o valor de 6,23 m (período de retorno de 75 anos), 3,14 m acima da cota de atenção. Exceto pelo Rio Gravataí, os níveis em todos os rios ultrapassaram o período de retorno de 100 anos (Figura 7).



Fonte: Cemaden.

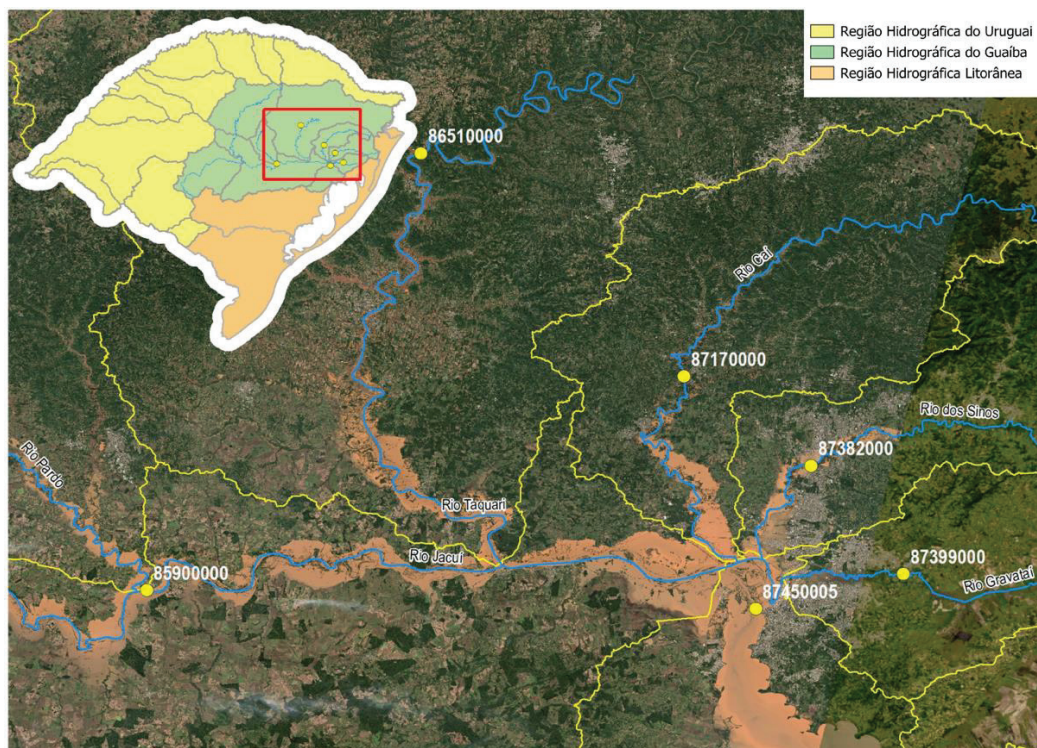
Figura 5 – Bacias hidrográficas do estado de Rio Grande do Sul.

Tabela 1 – Descrição das grandes bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul

Bacia	Área de drenagem (km ²)	População urbana*	População rural*
Guaíba	85.279	6.803.136	807.154
Uruguai	126.570	1.834.688	573.282
Litorâneas	59.249	1.105.665	253.620

* Em 2020.

Fonte: Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>>.



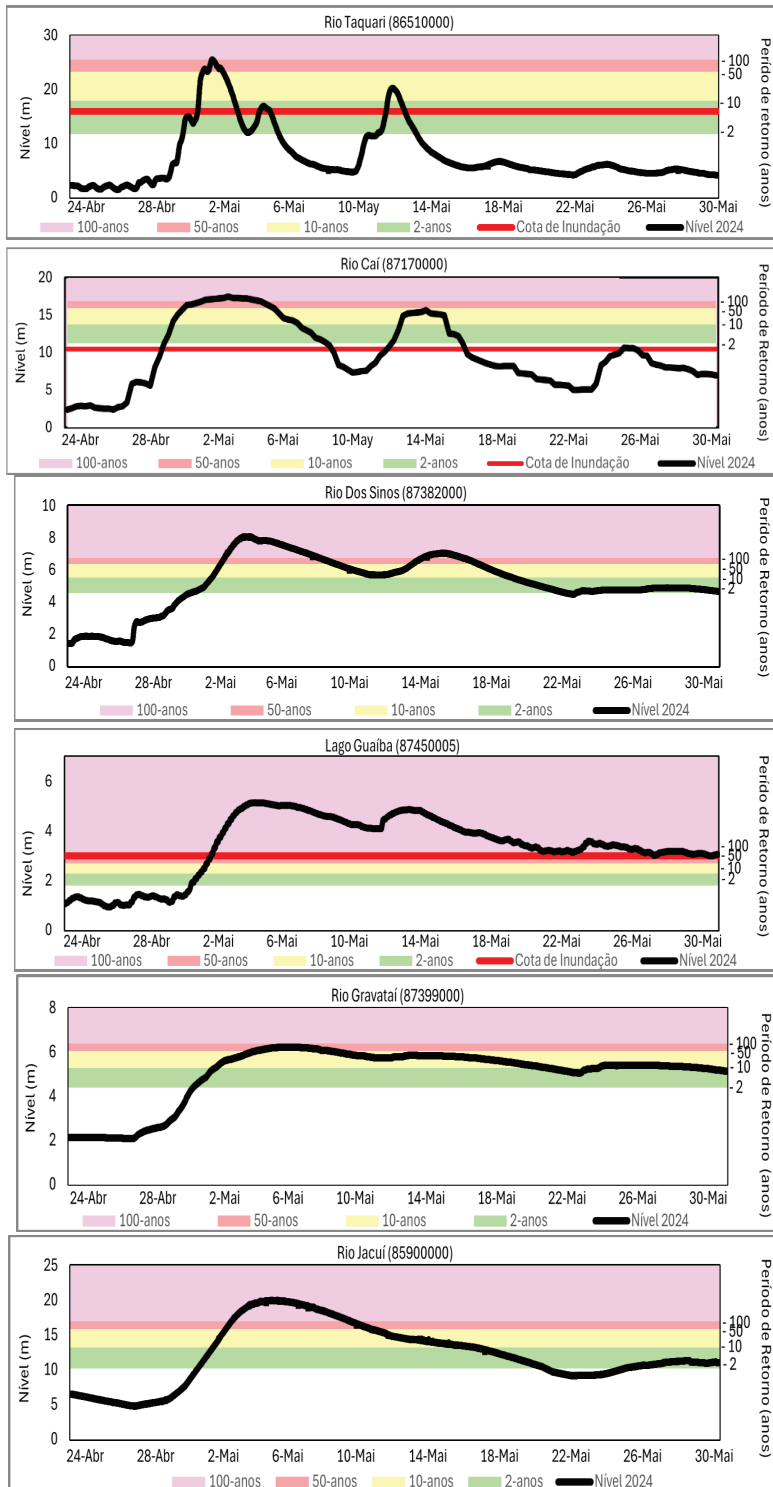
Fonte: Cemaden.

Figura 6 – Localização das regiões hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul e das estações hidrológicas acima da imagem de satélite da Planet do dia 6 de maio de 2024.

Tabela 2 – Descrição das estações hidrológicas

Nome	Código	Localização	Cota de atenção (m)	Cota de inundação (m)	Nível máxima	Data
Rio Pardo	85900000	Rio Jacuí	Atenção (m)	Não possui	2024 (m)	5/5/2024
Muçum	86510000	Rio Taquari	8,87	16,00	20,04	2/5/2024
Barca do Cai	87170000	Rio Cai	9,00	10,00	25,57	2/5/2024
São Leopoldo	87382000	Rio Sinos	7,00	Não possui	17,45	4/5/2024
Passo das Canoas	87399000	Rio Gravataí	3,95	Não possui	8,11	6/5/2024
Ilha Pintada	87450005	Lago Guaíba	3,09	3,00	6,23	6/5/2024
Cais Mauá C6	87450004	Lago Guaíba	não possui	3,00	5,15	6/5/2024
			não possui		5,33	

Fonte: A. Cuartas-Cemaden.



Fonte: A. Cuartas-Cemaden.

Figura 7 – Hidrógrafas para o período de 24 de abril a 30 de maio de 2024, dos eventos das inundações nas estações hidrológicas Rio Pardo, Muçum, Barca do Cai, São Leopoldo, Passo das Canoas e Ilha Pintada.

Monitoramento e alertas de risco hidrológico

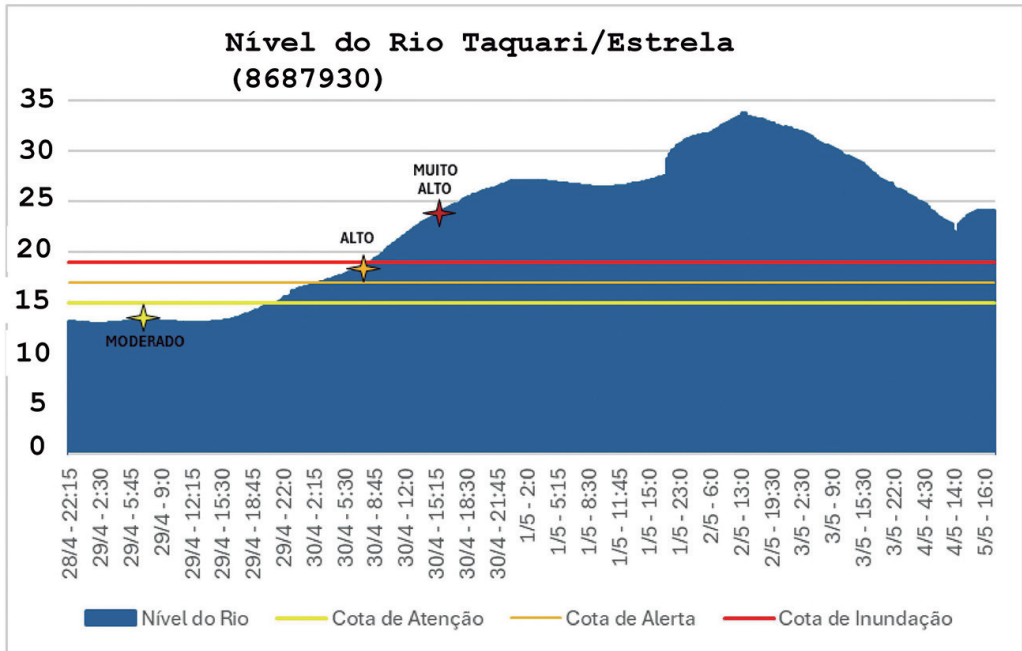
Como detalha Moraes (2023), no âmbito da governança de desastres naturais no Brasil, o Cemaden/MCTI monitora e emite alertas antecipados de riscos de inundações e/ou deslizamentos de terra, que incluem informações sobre os prováveis impactos potenciais em pessoas expostas e vulneráveis que vivem em zonas de risco. Os alertas são emitidos diretamente aos municípios e também de forma simultânea ao Centro Nacional de Gestão de Riscos e Desastres (Cenad). Esses alertas então são retransmitidos por meios alternativos aos organismos estaduais e municipais. Por sua vez, as estruturas de Defesa Civil dos municípios contam com mecanismos próprios para transmitir serviços massivos de mensagens (SMS), que são enviados diretamente às comunidades em risco em nível local e distrital.

Os primeiros alertas municipais de risco hidrológico enviados para o estado do Rio Grande do Sul foram para na região central e oeste, iniciando-se em Alegrete (RS) no dia 29 de abril, 11:01 AM, no nível Moderado. Este alerta foi logo atualizado para o nível ALTO no dia 1 de maio 07:32 AM após o registro de 121mm em 48 horas e com o nível do Rio Ibiraputiã em 10,27m e taxa de elevação de 0,09m/h. Nesse dia, concernente com as previsões meteorológicas disponibilizadas nos dias anteriores, os maiores acumulados de chuva eram esperados na porção central e oeste do RS, muito embora já estivesse chovendo também na Bacia do Taquari. Nesse mesmo dia (29), ainda foram enviados alertas de risco hidrológico moderado para Rosário do Sul, Dom Pedrito, Venâncio Aires, Alto Feliz, Santa Maria, Lajeado, Estrela e Cachoeiro do Sul. A maioria destes alertas teve seu nível elevado para risco ALTO no dia seguinte (30).

Na Bacia do Taquari (Figura 8), o primeiro alerta enviado foi para Venâncio Aires (RS) também no dia 29 de abril, 11:41 AM, no nível Moderado, quando não havia registro de chuva no território municipal nas últimas 24 horas. Este alerta subiu para nível ALTO, cerca de 22 horas depois (dia 30 de abril, 08:59 AM) quando 100 mm foram registrados em cerca de 18 horas e o Rio Taquari encontrava-se em 13,52 m, com taxa de elevação de 0,042 m/h, segundo a estação fluviométrica Bom Retiro do Sul (SACE/CPRM) – 8688200 naquele instante. No dia seguinte, 2.5.2024 esse município teve o seu alerta elevado para o nível de risco MUITO ALTO, quando 352 mm foram registrados em 72 horas e o Rio Taquari já causava barramento non Arroio Castelhana, indicando agravamento significativo no território municipal.

Importante mencionar que, embora Venâncio Aires tenha sido o primeiro município da Bacia do Taquari a receber alerta no nível moderado no dia 29 de abril, outros municípios tiveram sua situação prognosticada em casos mais críticos com maior antecipação. Este foi o caso, por exemplo, do município de Lajeado onde o alerta foi aberto também no dia 29 em nível moderado (05:28 PM), antes mesmo do Rio Taquari atingir a cota de atenção, pois já constavam informações de previsões meteorológicas e hidrológicas indicando a possibilida-

de de agravamento significativo nas horas seguintes. Lajeado foi um dos primeiros municípios que recebeu alerta de risco hidrológico ALTO (dia 30 de abril às 07:44AM) e nível MUITO ALTO às 03:52 PM, quando eram registrados 85 mm em 6 horas e de 218 mm em 24 horas. Nesse instante eram observados acumulados significativos em toda a Bacia do Taquari, indicando o agravamento e permanência das inundações e alagamentos nos dias subsequentes. A seguir, apresenta-se um quadro com a evolução do nível do Rio Taquari e os alertas municipais enviados pelo Cemaden para o município de Lajeado.



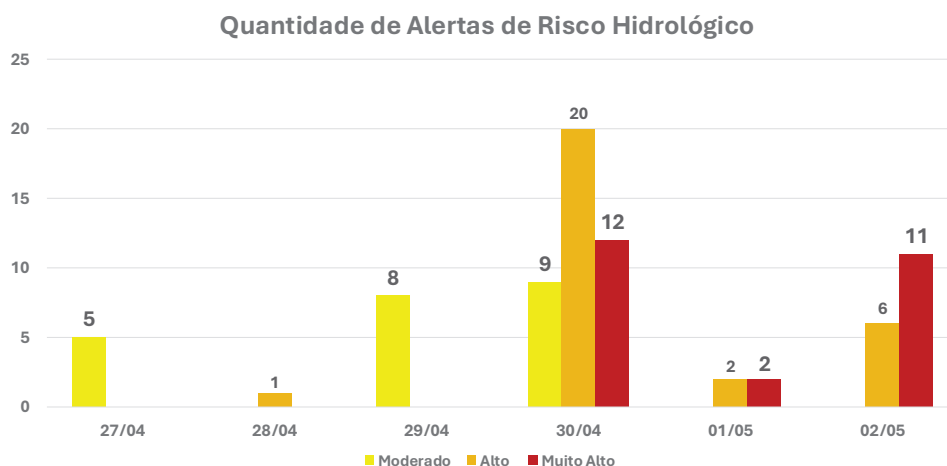
Fonte: Cemaden.

Figura 8 – Em azul, evolução do Nível do Rio Taquari no município de Estrela, pela estação 8687930 do SACE (SGB-CPRM) com as respectivas cotas de atenção, alerta e inundação. Os alertas do Cemaden estão referenciados por estrelas na cor amarela, laranja e vermelha, que representam os níveis de risco moderado, alto e muito alto, respectivamente.

Especificamente sobre Porto Alegre, o primeiro alerta foi enviado no nível Moderado no dia 30 de abril às 02:38 AM, atualizado para Alto cerca de 5 horas depois (07:50 AM) e chegando no nível Muito Alto ainda no dia 1 de maio às 23:42, quando havia chovido até 400 mm em 72 h na Bacia do Guaíba. Importante mencionar que naquele instante o nível do Lago Guaíba ainda se encontrava em 2.23 m (abaixo da cota de atenção de 2.55 m e da cota de inundação em 3,00 m), com uma taxa de 2 cm/h segundo a estação fluviométrica Cais Mauá C6. O alerta de risco Muito Alto enviado para Porto Alegre possuía a mensagem clara acerca da continuidade das chuvas persistentes e com pancadas de alta intensidade na bacia de contribuição ao município durante os dias

seguintes. Ademais, o alerta também explicitava a condição de elevação do nível fluviométrico a montante do município e que a onda de propagação dos rios Taquari, Caí, Sinos, Gravataí e Baixo Jacuí, somada à previsão meteorológica e a saturação do solo, com recomendações de atenção especial à população que habita as margens dos respectivos rios, de seus tributários e do Guaíba, especialmente as 6.613 moradias previamente mapeadas pela CPRM em áreas de risco de inundação. Tais como outros alertas de nível Muito Alto, o documento enviado carregava a seguinte mensagem explícita: “há probabilidade muito alta de ocorrência do fenômeno alertado e com potencial para causar grande impacto na população. Recomendam-se aos órgãos Municipais de Proteção e Defesa Civil as ações previstas no Plano de Contingência Municipal, tais como: verificação *in loco* nas áreas de risco, acionamento de sistema de sirenes, possibilidade de desocupação das áreas de risco, deslocamento das equipes de resposta para as proximidades das áreas de risco etc.”.

A seguir, na Figura 9, estão sumarizados a quantidade de alertas de risco hidrológico enviados durante o período de 27 de abril até 2 de maio, categorizados por nível de risco (moderado, alto e muito alto). Para essa tabela, a mudança de nível de um alerta vigente (por exemplo, do nível moderado para alto) é contabilizada como um novo alerta. O maior número de Alertas Alto e Muito Alto foi para o dia 30 de abril.

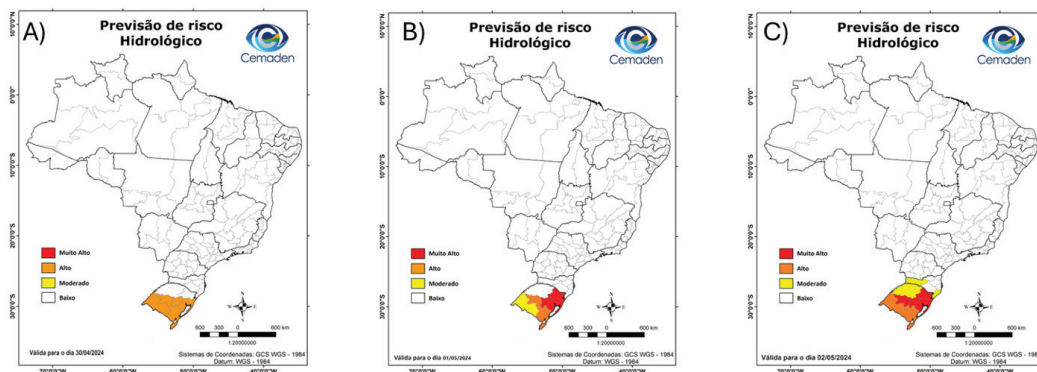


Fonte: Cemaden.

Figura 9 – Boletins de Previsão de Risco Hidrológico para os dias 30 de abril (a), 1º (b) e 2 de maio (c).

A seguir estão apresentados os boletins de previsão de risco hidrológico para os dias 30 de abril e 1 e 2 de maio (Figura 10). Os boletins de previsão de risco hidrológico já prognosticavam uma situação de risco pelo menos alto desde o dia 29, data em que o boletim para o dia 30 foi elaborado. Com o agravamento do cenário meteorológico observado e persistência das previsões

numéricas ainda indicarem volumes de precipitação superiores a 100 mm/dia, os boletins para os dias 1 e 2 indicava a situação mais crítica (Risco Muito Alto) para as regiões contempladas na Bacia do Taquari.



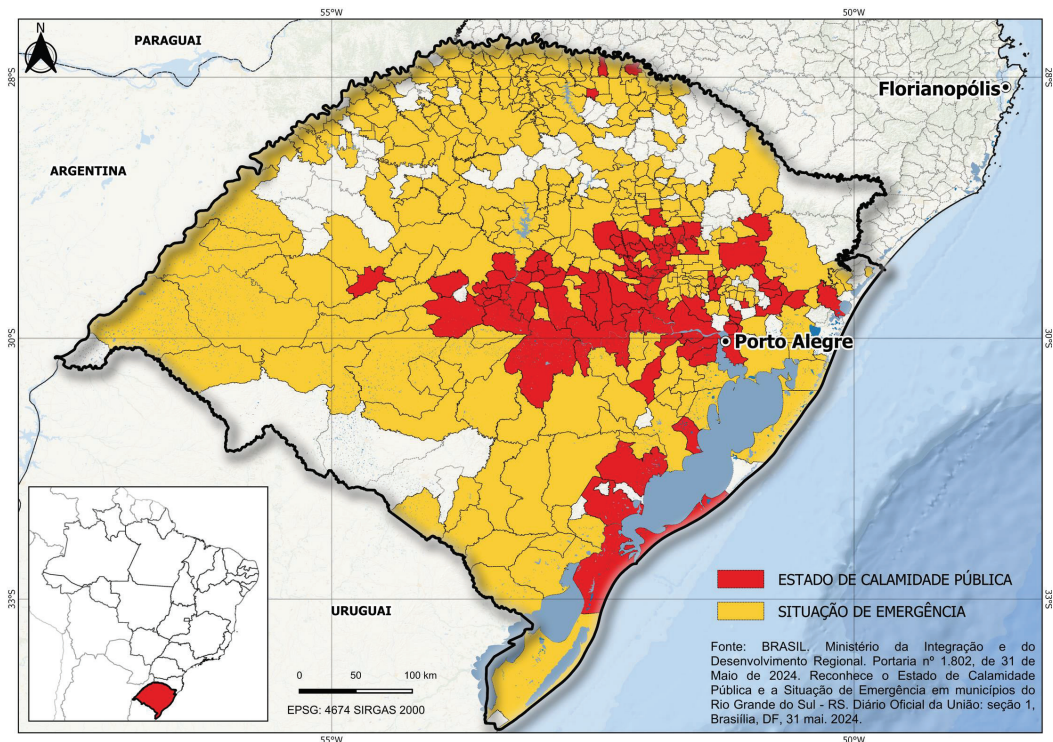
Fonte: Cemaden.

Figura 10 – Boletins de Previsão de Risco Hidrológico para os dias 30 de abril (a), 1º (b) e 2 de maio (c).

Decretação de emergência, impactos e resposta

No dia 31 de maio a Defesa Civil de Rio Grande do Sul (Defesa Civil, 2024) emitiu um decreto ampliando o número de municípios em estado de calamidade e em emergência, e foram identificados 78 municípios em estado de calamidade (entre elas, Muçum, Taquari, Santa Maria, Bento Gonçalves, Porto Alegre, Gramado, Lajeado, Encantado, Estrela, Pelotas, Guaíba, Eldorado do Sul, Caxias do Sul e Rio Grande) e 340 em situação de emergência (Figura 11). A Situação de Emergência é declarada quando eventos adversos, sejam naturais, sejam provocados pelo homem, causam danos e prejuízos que comprometem, de forma parcial, a capacidade de resposta do poder público do ente federativo afetado. Nesse cenário, os danos são significativos, mas ainda controláveis com recursos disponíveis, possivelmente com apoio limitado de outros níveis de governo.

O Estado de Calamidade Pública é declarado quando a magnitude do desastre é tão grande que os danos e prejuízos causados ultrapassam a capacidade de resposta do poder público do ente federativo afetado. Esse estado reflete uma situação de extrema gravidade que requer um esforço considerável e coordenado de recursos externos para a resposta e recuperação. Até o dia 14 de junho, esse é um balanço sobre a situação no Rio Grande do Sul: municípios afetados: 478 (de um total de 497 em todo o estado); pessoas em abrigos: 16.128; desalojados: 422.753; afetados: 2.398.255; feridos: 806; desaparecidos: 38; óbitos confirmados: 175; pessoas resgatadas: 77.729; animais resgatados: 12.527 (Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024). Segundo a CNM as chuvas e inundações produziram R\$ 11,4 bilhões em prejuízos financeiros.



Fonte: Brasil-MIDR.

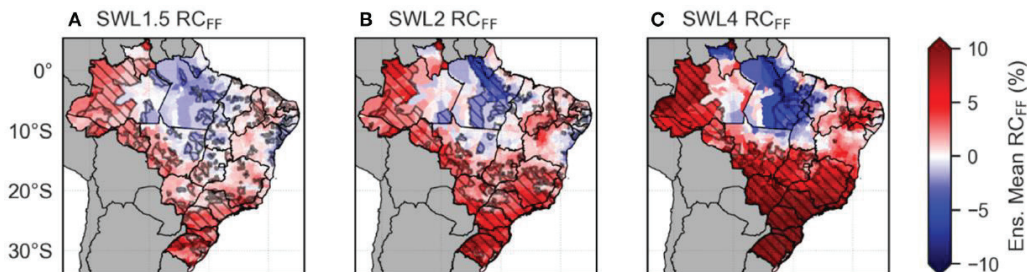
Figura 11 – Municípios com declaração de estado de emergência e de calamidade no estado de Rio Grande do Sul até 31 de maio de 2024.

A sequência de desastres apresentada na segunda seção com impactos crescentes evidencia duas coisas. Por um lado, a realidade de que os eventos extremos estão se tornando mais frequentes e mais intensos. Por outro, a incapacidade de lidarmos com a alta vulnerabilidade. O rompimento da comporta no dique do Guaíba e a sua consequência não foi causada por um evento extremo de tempo ou de clima. Foi a vulnerabilidade tecnológica que desencadeou as inundações que afetaram Porto Alegre. O desastre no Rio Grande do Sul, em 2024, também evidencia o quanto as altas vulnerabilidades foram o determinante nos impactos generalizados.

Cenários futuros de desastres para vários níveis de aquecimento global e atribuição de causas

No estudo de Marengo et al. (2021) foram considerados impactos potenciais de inundações e deslizamentos derivados das projeções de modelos climáticos para os vários níveis de aquecimento global (1,5; 2,0; e 4,0°C). Neste estudo consideraram-se os níveis de aquecimento global e não os cenários SRES usados no Brasil 2040 (SAE, 2015), sendo essa uma atualização importante nas abordagens mais recentes recomendadas pelo IPCC. No Brasil 2040, as projeções e avaliações das incertezas não foram possíveis de serem feitas devido à

disponibilidade de somente dois modelos (Eta-Miroc e Eta-Hadgem). Marengo et al., 2021 utilizaram 6 modelos disponibilizados pela iniciativa HELIX do UK Met Office (High-End cLimate Impacts and eXtremes), tendo obtido resultados ainda mais contundentes sobre o elevado impacto potencial de inundações e deslizamentos no estado do Rio Grande do Sul e na região Sul em geral, para vários níveis de aquecimento global, conforme pode ser observado na Figura 12.



Fonte: Marengo et al. (2021).

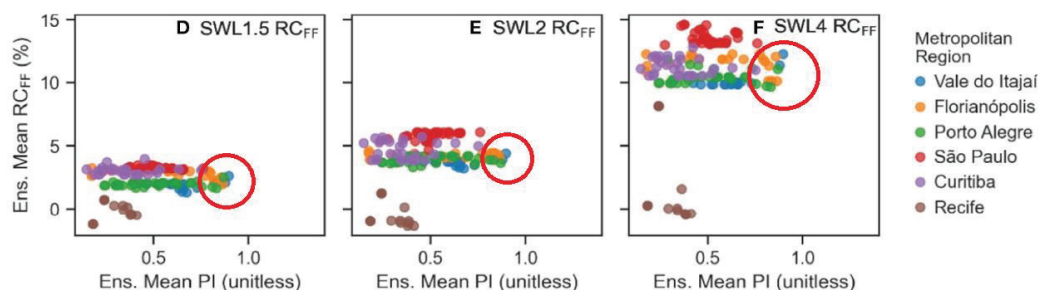
Figura 12 – Mapas da variação do indicador de Ameaça Climática para Inundações (RC_{FF}) em períodos futuros. A) resultado para a situação em que o aquecimento global atingisse 1,5°C acima das condições pré-industrial (1850-1900); B) acima de 2,0°C e C) acima de 4,0°C. Tons em vermelho indicam a intensificação de eventos extremos com potencial para causar inundações e as hachuras indicam onde há alta confiabilidade dos resultados.

No mesmo estudo acima referenciado, os autores ainda avaliaram a situação das principais Regiões Metropolitanas do Brasil, tendo a cidade de Porto Alegre, juntamente com o Vale do Itajaí e Florianópolis se destacando como aquelas em que houve maior combinação dos indicadores para o tempo presente (eixo horizontal) e o aumento esperado para o futuro do risco de inundações segundo o nível de aquecimento global (eixo vertical), conforme apresentado na Figura 13.

Pelas análises, ficou evidente que Porto Alegre (em verde) já era considerada como uma das localidades mais críticas do Brasil na análise de risco relacionado às inundações (pontos que se localizam mais à direita), e que também se singulariza por significativos aumentos devido às mudanças climáticas, especialmente nos casos com aquecimento global acima de 2,0°C (eixo vertical).

Um estudo recente da World Weather Attribution (WWA 2024) sugere que as mudanças climáticas antrópicas aumentaram em duas vezes a probabilidade de ocorrência das chuvas históricas que causaram enchentes devastadoras no Rio Grande do Sul entre o final de abril e início de maio 2024. Segundo esse estudo rápido de atribuição, o fenômeno El Niño, que traz condições chuvosas à região, desempenhou um papel semelhante ao intensificar as chuvas, enquanto falhas na infraestrutura pioraram os danos da enchente no Guaíba em Porto Alegre. No estudo, estima-se que o El Niño aumentou a probabilidade do evento em um fator de 2 (duas vezes mais provável) e tornou as chuvas cerca de 3%-10%

mais intensas. A mudança climática provocada pelo homem tornou o evento duas vezes mais provável e cerca de 6%-9% mais intenso. Esse já é o segundo estudo de atribuição a apontar que as mudanças climáticas provocadas pela ação humana tornaram as chuvas no Rio Grande do Sul de mais intensas. O primeiro foi publicado *ClimaMeter* (2024).



Fonte: Marengo et al. (2021).

Figura 13 – Gráficos com resultados para algumas regiões metropolitanas do Brasil que se destacaram nas análises de impacto potencial às inundações. O eixo horizontal representa a média do indicador de Impacto Potencial relacionado às inundações para o tempo presente; o eixo vertical representa a média do aumento relativo (em porcentagem) do indicador de chuvas potencialmente deflagradoras de inundações, nos respectivos cenários de aquecimento SWL, conforme legenda.

Discussões

Durante a catástrofe climática, extremos de chuvas foram registrados em quase todo Rio Grande do Sul e o pior exemplo ocorreu em Bento Gonçalves, onde em apenas dois dias choveu mais de 400 mm sendo que a média climatológica de chuvas para o mês de maio é de aproximadamente 150 mm. A tendência de aumentos nos extremos de chuvas faz parte de uma tendência já observada no Sudeste da América do Sul incluindo o sul do Brasil e outras partes da baixa da Bacia do Paraná/Prata, durante os últimos 60 anos (Dunn et al., 2024, PBMC, 2014). Isto é, de aumento de extremos de chuvas. Tendência similar de aumento na chuva total e nos extremos de chuva tem sido projetada pelos dos modelos do IPCC AR6 para as próximas décadas e nos vários níveis de aquecimento (IPCC 2021, 2022). Essa tendência de aumento de extremos observada em todo o mundo está associada ao aquecimento global. Um aumento da temperatura pode aumentar o conteúdo de umidade na atmosfera e acelerar o ciclo hidrológico, gerando chuvas intensas (IPCC 2012). Certamente, estudos de atribuição são necessários, para determinar se estes extremos de chuvas são consequência das mudanças climáticas antrópicas. Outros eventos de extremos de chuvas em outras regiões do mundo têm sido associados às mudanças climáticas segundo estudos de atribuição, mas no caso dos extremos registrados no estado do Rio Grande do Sul ainda é cedo para tal afirmação.

Não obstante, podemos afirmar que os desastres gerados por chuvas intensas são consequência de atividades humanas. Estudos realizados avaliaram a situação das principais Regiões Metropolitanas do Brasil, tendo a cidade de Porto Alegre, juntamente com o Vale do Itajaí, se destacado como aquelas em que houve maior combinação dos indicadores para o tempo presente e o aumento esperado para projeções de clima futuro. Ficou evidente que Porto Alegre já era considerada como uma das localidades mais críticas do Brasil na análise de riscos relacionado às inundações, e que também se singulariza por significativos aumentos devido às mudanças climáticas (Debortoli et al., 2017; Marengo et al., 2021).

As causas profundas que levaram a que a ameaça de inundação se tornasse numa catástrofe resultaram das escolhas humanas e das condições estruturais implícitas num modo escolhido de desenvolvimento e crescimento. Essas foram amplificadas por escolhas políticas, de gestão e técnicas na forma como o risco de desastres é abordado (UNDRR, 2023). No presente, construções em áreas com risco de inundações nas margens do Guaíba, que já foram inundadas em setembro de 2023, voltaram a ser inundadas em maio de 2024 com maior número de fatalidades.

Estruturas hidráulicas que protegem a cidade de Porto Alegre não resistiram as ondas de inundações e romperam, o que sugere que foram subdimensionadas, com falta de manutenção ou que não se consideraram que os volumes e intensidade das chuvas poderiam aumentar com o tempo. Em Porto Alegre, o sistema de contenção de cheias, composto por um muro e uma série de diques, apresentou falhas de funcionamento. Comportas romperam ou vazaram, e estações de bombeamento de água de volta para o Guaíba deixaram de operar provavelmente por falta de manutenção (Medina, 2024). A falta de resiliência de Porto Alegre frente aos extremos de clima foi detectada em 1941 e em 2023, e esse é o caso de outras grandes cidades que podem não estar preparadas para extremos climáticos como os ocorridos em 2024 ou nas próximas décadas. Assim, as mudanças climáticas podem aumentar o cenário de risco de desastres em áreas urbanas no Brasil, ainda nessa década, como os já registrados nas cidades de Petrópolis (RJ) e Recife (PE) em 2022, em São Sebastião (SP) em 2023, e no Rio Grande do Sul em setembro de 2023, janeiro de 2024 e abril/maio de 2024.

Conclusões

O desastre ocorrido no Rio grande do Sul entre o final de abril e começo de maio de 2024 foi considerado a pior catástrofe do Brasil em relação ao número de afetados e muito provavelmente aos impactos econômicos de infraestrutura, especialmente de residências. Essa tragédia climática foi caracterizada por uma combinação de eventos extremos de precipitação crescente e mudanças nos padrões regionais de circulação. Extremos de chuva na região Sul do Brasil estão aumentando em intensidade e frequência desde 1950, e os aumentos de eventos de chuva projetados no médio e longo prazos servem de alerta em relação

à intensidade e frequência de eventos extremos de chuva. Fortes chuvas podem deflagrar inundações bruscas, enchentes e deslizamentos de terra que podem afetar regiões vulneráveis e populações expostas.

Há necessidade de implementar ações preventivas com a população mais vulnerável assim como atividades de educação ambiental para a sociedade, a fim de aumentar a percepção de risco de desastres por parte da população e do poder público. É necessário aperfeiçoar sistemas de previsão de tempo e de alertas de risco de desastres causados por extremos climáticos, e assim salvar vidas e proteger as populações em áreas de risco. Não só o estado de Rio Grande do Sul está em risco, mas todo o Brasil. Diante deste cenário, estratégias de planejamento urbano que promovam formas e estruturas mais sustentáveis são essenciais para a adaptação aos impactos das mudanças climáticas.

Fazer a Gestão do Risco é mais do que fazer a previsão do tempo e emitir os alertas de risco de desastres. Atualmente o Brasil tem capacidade de monitorar e emitir alertas e, também, capacidade de fazer a gestão do desastre. Mas ainda falta a gestão do processo localizado entre estas duas pontas. Um caminho para as cidades prevenirem mortes, danos à infraestrutura e perdas materiais decorrentes de desastres relacionados aos extremos do clima e as mudanças climáticas é o Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas. Esses planos são feitos para ajudar a reduzir os impactos de desastres junto à população e podem salvar vidas e diminuir perdas materiais nas tragédias. Segundo o site Publica (Publica, 2024), das 27 capitais do Brasil, 16 não têm um plano concluído. As capitais que não têm plano finalizado são: Aracaju, Belém, Boa Vista, Campo Grande, Cuiabá, Florianópolis, Goiânia, Macapá, Maceió, Manaus, Natal, Palmas, Porto Alegre, Porto Velho, São Luís e Vitória. As prefeituras de Belém, Florianópolis, Macapá, Manaus, Natal, Porto Alegre e Vitória estão elaborando seus respectivos planos de enfrentamento às mudanças climáticas. A triste experiência de Porto Alegre em maio de 2024 mostra que as mudanças climáticas já afetam negativamente a infraestrutura urbana, a prestação de serviços públicos e o bem-estar da população.

Nota

1 Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>>.

Referências

ALCÂNTARA, E. et al. Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, v.23, p.1-19, 2023. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1-2023>.

ALVALÁ R.C.S. et al. Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 110 (2024) 104645, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104645>.

ANA 2024. Histórico de previsões-Histórico de previsões do Rio Grande do Sul, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/historico-de-previsoes>>. Acesso em: 4 jun. 2024.

CLIMAMETER. 2024. Mudança climática tornou chuvas no RS mais intensas, aponta estudo, Disponível em: <<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/05/10/mudanca-climatica-tornou-chuvas-no-rs-mais-intensas-aponta-estudo.ghtml>>. Acesso em: 4 jun. 2024.

CNM. 2022. Chuvas no Brasil causaram prejuízo de R\$ 55,5 bi entre 2017 e 2022, diz CNM, Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2022/01/20/chuvas-no-brasil-causaram-prejuizo-de-r-555-bilhoes-em-5-anos-diz-cnm.htm>>. Acesso em: 30 maio 2024.

CNM. 2024. Boletim CNM destaca os prejuízos dos desastres naturais na habitação; confira!, Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/boletim-cnm-destaca-os-prejuizos-dos-desastres-naturais-na-habitacao-confira>>. Acesso em: 28 maio 2024.

DEBORTOLI, N. S. et al. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards*, v.85, p.1-25, 2017.

DEFESA CIVIL. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS - 31/5, 9h Disponível em: <<https://estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-31-5-9h>>. Acesso em: 14 jun. 2024.

DUNN, R. J. H. et al. Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices— An extension to HadEX3. *Earth and Space Science*, v.11, e2023EA003279, 2024. <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>.

DW. 2023. Desastres recentes no RS mataram mais do que em 3 décadas, Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/desastres-recentes-no-rs-mataram-mais-do-que-soma-de-3-d%C3%A9cadas/a-68994869>>. Acesso em: 30 maio 2024.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 3/6. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. 2024. Disponível em: <<https://estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-nors-3-6-9h>>. Acesso em: 5 jun. 2024.

IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. FIELD, C. B. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

IPCC. Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Ed.) *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: Cambridge University Press, 2021. p.3-32. doi:10.1017/9781009157896.001, 2021.

IPCC. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: PÖRTNER, D. C. et al. (Ed.) *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: Cambridge University Press, 2022. p.3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

- KOUSKY, V. E.; CAVALCANTI, I. F. A. Eventos Oscilação Sul–El Niño: Características, evolução e anomalias de precipitação. *Cienc. Cult.*, v.36, p.1888-9, 1984.
- 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. *Frontiers in Climate*, v.3, p. 610433, 2021.
- MARENGO, J. A. et al. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: causes, impacts, and disaster preparedness. *Weather Climate Extremes*, v.39, 100545, 2023a. [https://doi.org/10.1016/j. 2022. 100545](https://doi.org/10.1016/j.wce.2022.100545)
- MARENGO, J. A. et al. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. *Nat Hazards*, v.116, p.3617-44, 2023b. [https://doi.org/10.1007/s11069- 023- 05827-z](https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z)
- MEDINA, T. “O sistema anti-enchente falhou por falta de manutenção”, avaliam especialistas, *Matinal Jornalismo*. Disponível em: <<https://www.matinaljornalismo.com.br/matinal/reportagem-matinal/falta-manutencao-sistema-causou-inundacao-enchente-porto-alegre/>>. Acesso em: 6 maio 2024.
- MORAES, O. L. Proposing a metric to evaluate early warning system applicable to 981 hydrometeorological disasters in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v.982 87, 103579, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103579>
- PBMC. Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Ed. A. T. Ambrizzi, M. Araujo. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 464p.
- PONT, R., Em 1959, chuvas deixaram mais de 90 mortos no RS, *Rádio Guaíba*. Disponível em: <<https://guaiba.com.br/2023/06/20/em-1959-chuvas-deixaram-mais-de-90-mortos-no-rs>>. Acesso em: 3 maio 2024.
- PUBLICA. Por que muitas capitais brasileiras ainda não têm planos contra mudanças, Disponível em: <<https://apublica.org/2024/05/por-que-muitas-capitais-brasileiras-ainda-nao-tem-planos-contra-mudancas-climaticas/>>. Acesso em: 30 maio 2024.
- ROZANTE, J. R. et al. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Wea. Forecasting*, v.25, p.885-94, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.
- SATYAMURTY, P. et al. Tropics: South America. Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteor. Monogr. *Amer. Meteor. Soc.*, n.40, p.119-39, 1998.
- SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS SAE, Brasil 2040. Resumo Executivo, Secretaria de Assuntos Estratégicos. Brasília: Presidência da República, 2015. 62p.
- SILVEIRA, A. L. L. Chuvas e vazões da grande enchente de 1941 em Porto Alegre/RS. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, v.35, p.69-90, 2020.
- UNISDR, Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) and the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)-Institute of Health and Society (Université Catholique de Louvain), 2017. 33p.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION UNDRR, GAR

Global Assessment Report. United Nations, 2023. 256.p. Disponível em: <www.undrr.org/GAR2022>.

UOL. Com chuvas, Cataratas do Iguaçu têm vazão 5 vezes acima do normal, Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2024/05/06/cataratas-vazao-alta.htm>>. Acesso em: 3 maio 2024a.

UOL. RS tem previsão de dias sem chuva após mês mais chuvoso desde 1910, Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2024/05/29/rs-previsao-de-tempo-sem-chuva-e-frio.htm>>. Acesso em: 31 maio 2024b.

VALENTE, P. T. *Eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul no século XX a partir de dados de reanálise e registros históricos*. Porto Alegre, 2018. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VELASCO, E.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. *J. Geophys. Res.*, v.92, p.9591-613, 1987.

WORLD WEATHER ATTRIBUTION WWA. 2024. Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil, Disponível em: <<https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/>>. Acesso em: 5 jun. 2024.

RESUMO: As inundações sem precedentes de abril a maio de 2024 no Rio Grande do Sul afetaram mais de 90% do estado, deslocando centenas de milhares de pessoas e causando 172 mortes. O fenômeno El Niño Oscilação Sul foi considerado importante para explicar a variabilidade nas chuvas observadas, consistente com pesquisas anteriores que mostram que eventos anteriores de fortes chuvas na área ocorreram durante anos de El Niño. As frentes frias que trazem chuvas permaneceram estacionadas no sul do Brasil, uma vez que não puderam se mover para o centro do Brasil devido ao bloqueio atmosférico com ar quente e seco e às temperaturas mais altas naquela região. A inundação em Porto Alegre foi desencadeada por fortes chuvas na Bacia do Guaíba, com acumulações superiores a 500 mm em 5 dias, levando a níveis recordes de 5,35 m em 5 de maio, valores mais altos que a enchente anterior, em 1941. Além do caráter extremo deste evento, isso contribuiu para os impactos significativos de enchentes em áreas vulneráveis da Região Metropolitana de Porto Alegre e municípios próximos. Isso mostra a necessidade de avaliar objetivamente o risco e reforçar a infraestrutura para inundações para aumentar a resiliência a esta e futuras enchentes, ainda mais extremas.

PALAVRAS-CHAVE: Enchentes, Risco, Impacto, Mudanças climáticas, Variabilidade climática, Desastre.

ABSTRACT – The unprecedented 2024 April-May floods in the State of Rio Grande do Sul have affected over 90% of the state, displacing hundreds of thousand people and causing 171 deaths. The El Niño Southern Oscillation phenomenon was found to be important to explain the variability in the observed rainfall, consistent with previous research that show previous heavy rainfall events in the area occurred during El Niño years. Cold front fronts bringing rainfall remained stationary over southern Brazil, since they could not move into central Brazil because of atmospheric blocking with

warm and dry air and highest temperatures in that region. The flood event in Porto Alegre was triggered by heavy rainfall over the Lake Guaíba Basin, with accumulated surpassing 500 mm in 5 days, leading to record high levels of 5,35 m on May 5, highest that the previous flood in 1941. In addition to the extreme nature of this event, this contributed to the significant impacts of flooding in vulnerable areas of the Porto Alegre Metropolitan Region and nearby municipalities. This highlights the need to objectively assess risk and reinforce flood infrastructure to increase resilience to this and future, even more extreme, floods.

KEYWORDS: Floods, Risk, Impact, Climate change, Climate variability, Disaster.

José A. Marengo é professor do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Unesp/Cemaden. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden, Graduate School of international Studies. Korea University, Seoul, South Korea. @ – jose.marengo@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-8154-2762>.

Giovanni Dolif atua no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – giovanni.dolif@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0001-7996-4934>.

Adriana Cuartas é professora do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Unesp/Cemaden. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – adriana.cuartas@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0001-8993-5985>.

Pedro Camarinha atua no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – pedro.camarinha@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-1316-3066>.

Demerval Goncalves atua no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – demerval.goncalves@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-9893-5845>.

Rafael Luiz atua no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – rafael.luiz@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-5291-0888>.

Larissa Silva atua no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – larissa.silva@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0001-6722-3207>.

Regina C. S. Alvala é professora do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Unesp/Cemaden. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – regina.alvala@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-7528-5026>.

Marcelo E. Seluchi atua no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais Cemaden. @ – marcelo.seluchi@cemaden.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-3597-6797>.

Oswaldo L. Moraes é professor do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Unesp/Cemaden, Secretaria de Políticas e Programas Estratégicos, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. @ – osvaldo.moraes@mcti.gov.br / <https://orcid.org/0000-0002-5830-0079>.

Wagner R. Soares é pesquisador da Universidade Federal de Espírito Santo (ES).
@ – admcirrus@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-8299-8753>.

Carlos A. Nobre é professor do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Unesp/Cemaden. Instituto de Estudos Avançados, Universidade de São Paulo.
@ – cnobre.res@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-5808-8784>.

Recebido em 16.6.2024 e aceito em 20.8.2024.

^I Universidade Estadual Paulista, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São Jose dos Campos, São Paulo, Brasil, Graduate School of international Studies. Korea University, Seoul, South

^{II,VIII} Universidade Estadual Paulista, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São Jose dos Campos, São Paulo, Brasil.

^{II,IV,V,VI,VII,IX} Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São Jose dos Campos, São Paulo, Brasil.

^X Universidade Estadual Paulista, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

^{XI,XII} Universidade de São Paulo, Instituto de Estudos Avançados, São Paulo, Brasil.

