



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS METEOROLÓGICOS QUE
DEFLAGRAM DESASTRES NATURAIS NOS ESTADOS DE MINAS
GERAIS E BAHIA: ESTUDO DE CASO

Thaís Aparecida Cortez Pinto

Itajubá–MG,
Brasil
2024

por

Thaís Aparecida Cortez Pinto

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (POSMARH) para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientador: Dr. Enrique Vieira Mattos

Coorientador: Dr. Diego Oliveira de Souza

Itajubá–MG,

Brasil

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
NATURAIS

**CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS METEOROLÓGICOS QUE
DEFLAGRAM DESASTRES NATURAIS NOS ESTADOS DE MINAS
GERAIS E BAHIA: ESTUDO DE CASO**

por

Thaís Aparecida Cortez Pinto

À Banca Examinadora composta pelos membros

Dr. Enrique Vieira Mattos (Orientador) - UNIFEI

Dr. Diego Oliveira de Souza (Coorientador) - CEMADEN

Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho - UNIFEI

Dr. Weber Andrade Gonçalves - UFRN

APROVADO (X) APROVADO COM RESTRIÇÕES () REPROVADO ()

Aos meus queridos avós Antônio Cortez, José Vieira, Maria de Jesus e Ana Tereza, que mesmo ausentes fisicamente, continuam a iluminar meu caminho com seu legado de amor e sabedoria. E aos meus amados pais, irmãos e irmã. Esta dissertação é dedicada com profunda gratidão e saudade a cada um de vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao término de mais uma etapa, volto-me para o passado e percebo que não foi fácil chegar até aqui. Conquistei esse feito graças à constante presença da minha família e amigos ao meu lado. Por esse motivo, expresso minha gratidão, em primeiro lugar, a Deus por conceder-me a força e saúde necessárias para concluir essa etapa.

Aos meus pais, Antonio e Geralda, e aos meus irmãos, Rodrigo, Matheus e Thamires e minha cunhada Danúbia, vocês são meu porto seguro e minha base. Nada disso teria sentido sem a presença de vocês ao meu lado. Agradeço profundamente por sempre acreditarem na minha capacidade e por me ensinarem que a verdadeira sabedoria reside na vida e no exemplo. Estendo meu agradecimento a todos os familiares que torceram por mim, em especial à família da minha tia Aparecida e tio Vando, e aos meus padrinhos, Paulo e Teresinha. Eles me apoiaram significativamente durante minha estadia em Itajubá, tratando-me sempre como filha. Às minhas primas "lindinhas", especialmente Lucila Cortez, Letícia Cortez e Ana Cristina, que estiveram presentes nos momentos importantes, agradeço por celebrarem minhas conquistas e por serem meu refúgio nos momentos difíceis.

Agradeço também aos amigos e amigas de São José dos Campos que permaneceram ao meu lado, superando a distância e as mudanças nas vidas pessoais de cada um.

Aos queridos amigos que me acompanharam desde a graduação, em especial Ivana Bastos, Flávia Fagundes, Raquel Pereira, Fabiana Teixeira, Juliano Reis, Denis Garcia, Sarah Marins, Gabriel Teodoro, Aline Aquino e Thales Victor, compartilhar as alegrias, desafios e medos da faculdade, da profissão e da vida mostrou-me que não estou sozinha. Sempre posso contar com vocês.

Aos amigos que fiz nos últimos dois anos, Karen Guimarães, Gabriela Santos e Carolina Bernardes, dividir a jornada do mestrado com vocês foi incrivelmente enriquecedor. Agradeço também a Paula Oda e ao João Gabriel, pela constante ajuda nos desafios do mestrado e a Tatiana Amaro, pela companhia no CEPREMG. Agradeço aos projetos Forró de Segunda e TrilhaZ, que se tornaram minha válvula de escape diante dos problemas e dificuldades. Com vocês, superei meus próprios limites e descobri uma nova versão de mim mesma. Um agradecimento especial a Maria Isabelly, Guilherme Carvalho, Anderson Lino, Pedro Myra, Aline Almeida e Isadora Silva pelas inúmeras conversas, risadas, jogos,

danças, trilhas e momentos compartilhados. Vocês foram essenciais para eu encontrar motivos para sorrir nos momentos difíceis.

Ao apartamento 202 e às agregadas, em especial Ana Flávia Carvalho, Lethícia Garcia, Ariane Aquino, Lara Akemi, Maria Eduarda Bozeli e Ana Clara Carvalho, agradeço por serem minha família e por juntas transformarmos o apartamento em um verdadeiro lar. Obrigada por todas as risadas, conversas, choros, inseguranças e sonhos compartilhados.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos, e ao meu coorientador, Dr. Diego Souza, por todo o conhecimento transmitido, pelo suporte, paciência e disponibilidade ao longo desses dois anos. Agradeço à UNIFEI, aos professores e técnicos de laboratório que foram parte da graduação e do mestrado, em especial Prof. Dr. Paulo Nunes e Prof. Dr. Rogério Melloni, obrigada pelo incentivo e confiança de sempre e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que cruzaram meu caminho durante a jornada acadêmica e que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação acadêmica e evolução pessoal.

“A sociedade que respeita as dinâmicas ambientais está sujeita a catástrofes; a sociedade que não respeita, está fadada a elas”

Aline Balta Viana

RESUMO

Os desastres naturais se manifestam como resultado da interação conflituosa entre fenômenos naturais extremos e comunidades em estado de vulnerabilidade. Esses fenômenos, no contexto das mudanças climáticas, tendem a ocorrer com maior frequência em todo o globo, especialmente aqueles relacionados a eventos climatológicos e meteorológicos. No Brasil, há um extenso histórico de eventos extremos de chuva que desencadearam desastres naturais. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o mês de dezembro de 2021 foi o mais chuvoso dos últimos 15 anos no norte de Minas Gerais e sul da Bahia. Algumas estações meteorológicas registraram recordes de chuva, como a estação de Lençóis–BA, que registrou 578 mm entre os dias 1 e 27 de dezembro, sendo 445,4 mm acima da média climatológica. As fortes chuvas deixaram aproximadamente 86 mil e 30 mil pessoas desabrigadas na Bahia e em Minas Gerais, respectivamente. Nesse contexto, este trabalho pretende analisar, além do histórico de desastres naturais em Minas Gerais e Bahia, os padrões meteorológicos e as consequências associadas aos desastres naturais ocorridos no norte de Minas Gerais e sul da Bahia nos dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021. Foram utilizados dados sobre desastres naturais, imagens de satélite, umidade do solo, reanálise, precipitação proveniente de estações pluviométricas e satélites. A partir desses dados, o histórico de desastres de Minas Gerais e da Bahia, as características meteorológicas do evento ocorrido em dezembro de 2021 e o cálculo do tempo de retorno foram analisados. Quanto ao evento entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021, o fenômeno que desencadeou as ocorrências foi a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Contudo, desde o início do mês, a região registrou elevados acumulados de chuva. Quanto ao tempo de retorno, foi possível observar que somente em Unaí–MG a chuva registrada superou o que é esperado a cada 100 anos. Sendo assim, evidencia-se a importância de conhecer as características locais e a precipitação histórica para classificar um evento como extremo, além de destacar a importância do setor público na mitigação e redução de danos dos desastres naturais.

Palavras-chave: Desastres Naturais, Minas Gerais, Bahia

ABSTRACT

Natural disasters manifest as a result of the conflicting interaction between extreme natural phenomena and vulnerable communities. These phenomena, within the context of climate change, tend to occur more frequently worldwide, especially those related to climatological and meteorological events. In Brazil, there is an extensive history of extreme rainfall events triggering natural disasters. According to the National Institute of Meteorology (INMET), December 2021 was the rainiest month in the last 15 years in northern Minas Gerais and southern Bahia. Some meteorological stations recorded rainfall records, such as the Lençóis–BA station, which recorded 578 mm between December 1st and 27th, 445.4 mm above the climatological average. The heavy rains left approximately 86,000 and 30,000 people displaced in Bahia and Minas Gerais, respectively. In this context, this study aims to analyze, in addition to the history of natural disasters in Minas Gerais and Bahia, the meteorological patterns and associated consequences of the natural disasters that occurred in northern Minas Gerais and southern Bahia on December 23rd, 24th, 25th, and 26th, 2021. Data on natural disasters, satellite images, soil moisture, reanalysis, precipitation from rain gauge stations, and satellites were used. Based on this data, the disaster history of Minas Gerais and Bahia, the meteorological characteristics of the event that occurred in December 2021, and the calculation of return period were analyzed. Regarding the event between December 23rd and 26th, 2021, the phenomenon that triggered the occurrences was the South Atlantic Convergence Zone (SACZ). However, since the beginning of the month, the region has recorded high rainfall accumulations. Regarding the return period, it was observed that only in Unaí–MG did the recorded rainfall exceed what is expected every 100 years. Thus, it is evident the importance of knowing the local characteristics and historical precipitation to classify an event as extreme, as well as highlighting the importance of the public sector in mitigating and reducing the damage from natural disasters.

Keywords: Natural Disasters, Minas Gerais, Bahia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil esquemático de situação normal, enchente e inundação	19
Figura 2 - Ilustração dos tipos de escorregamentos: (a) escorregamento translacional ou planar, (b) escorregamento rotacional ou circular e (c) escorregamento em cunha.	20
Figura 3 - Região de estudo e distribuição dos desastres naturais entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021. São contabilizados os seguintes tipos de desastres naturais (32 ao todo): inundações são indicadas por círculos amarelos, alagamentos por triângulos rosa, deslizamentos por losango verde e as enxurradas círculo vermelho.	27
Figura 4 - Fluxograma da metodologia aplicada para o atendimento dos objetivos do presente estudo.	32
Figura 5 - Distribuição dos tipos (chuva intensa, enxurrada, enchentes, alagamento, inundação, enchente, movimento de massa e vendaval) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2003 e 2016 proveniente do banco de dados do S2iD.	34
Figura 6 - Distribuição dos tipos (enxurrada, alagamento, inundação, movimento de massa) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2016 e 2022 proveniente do banco de dados do CEMADEN.	35
Figura 7 - Distribuição anual dos tipos (chuva intensa, enxurrada, enchentes, alagamento, inundação, enchente, movimento de massa e vendaval) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2003 e 2016 proveniente do banco de dados do S2iD.	37
Figura 8 - Distribuição anual dos tipos (enxurrada, alagamento, inundação, movimento de massa e queda de bloco) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2016 e 2022 proveniente do banco de dados do CEMADEN.	38
Figura 9 - Mapa de relevo da região de estudo e de localização dos desastres naturais.	39
Figura 10 - Jatos 250 hPa (shaded) e linhas de corrente em 250 hPa às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.	42
Figura 11 - Espessura 500-1000 hPa (shaded) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.	43
Figura 12 - Divergência 250 hPa (linhas azuis) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.	44

Figura 13 - Água precipitável (shaded) e escoamento em 850 hPa às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.	45
Figura 14 - Valores negativos de ômega a 500 hPa (shaded) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5. ...	46
Figura 15 - Carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil dos dias 23 a 26 de dezembro de 2021 às 12 UTC.....	47
Figura 16 - <i>Convective Available Potential Energy</i> (CAPE, Jkg^{-1}) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.	52
Figura 17 - Cisalhamento vertical do vento de 500 a 1000 hPa (ms^{-1}) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.	53
Figura 18 - Imagens de satélite (GOES-16, CH13 - $10,35 \mu\text{m}$) de 23 de dezembro de 2021 às 12:00 UTC a 26 de dezembro de 2021 às 18h UTC.....	55
Figura 19 - Umidade do solo a partir de dados do SMAP para os dias: a) 2, b) 14, c) 23 e d) 26 de dezembro de 2021.....	56
Figura 20 - Umidade do solo a partir de dados do SMAP para cada ponto de ocorrência dos desastres, de outubro de 2021 a janeiro de 2022, a) Deslizamento, b) Inundação, c) Alagamento e d) Enxurrada.	57
Figura 21 - Acumulado mensal de precipitação do CHIRPS para o período de 1991-2021 para os municípios que registaram desastres naturais.....	59
Figura 22 - Precipitação do CHIRPS, representando a média mensal de 1991-2020 (barras) e precipitação mensal para 2021 (linhas).	61
Figura 23 - Normal climatológica - INMET (1991-2020, barras) e acumulado mensal de 2021 (linha vermelha) da precipitação para: a) Unaí (MG) e b) Vitória da Conquista (BA).	62
Figura 24 - Acumulado diário do mês de dezembro de 2021 de precipitação para municípios monitorados pelo CEMADEN, para precipitação proveniente do CHIRPS (barra vermelha), pluviômetros (barra azul, amarela, rosa, verde, preta e roxa) do CEMADEN. Além das linhas com a média histórica de dezembro (1991-2020) e os percentis de 90, 95 e 99.....	64
Figura 25 - Acumulado diário de precipitação dos dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 para municípios monitorados pelo CEMADEN, para precipitação proveniente do CHIRPS (barra vermelha), pluviômetros (barra azul, amarela, rosa, verde, preta e roxa).	

Além das linhas com a média histórica de dezembro (1991-2020) e os percentis de 90, 95 e 99.....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desastres naturais ocorridos entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021 na Bahia e em Minas Gerais. Dados fornecidos pelo CEMADEN.	39
Tabela 2 - Percentis (90, 95, 99%) e a precipitação registrada de cada município com base no acumulado móvel de 3 dias, com base nos dados CHIRPS. Entre parênteses está indicado qual percentil foi ultrapassado.	67
Tabela 3 - Precipitação (mm/dia) estimada pelo CHIRPS para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.	69
Tabela 4 - Precipitação (mm/dia) registrada pelo CEMADEN para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado com base nos dados do CHIRPS para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.	70
Tabela 5 - Acumulado móvel de 3 dias da precipitação (mm/dia) estimada pelo CHIRPS para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.	71
Tabela 6 - Acumulado móvel de 3 dias da precipitação (mm/dia) registrada pelo CEMADEN para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado com base nos dados do CHIRPS para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.	73

SIGLAS

BA	-	Bahia
CAPE	-	<i>Convective Available Potential Energy</i>
CEMADEN	-	Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CEPED	-	Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil
CPTEC	-	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CHIRPS	-	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i>
ECMWF	-	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GOES - 16	-	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite-16</i>
GPM	-	<i>Global Precipitation Measuring</i>
IDH	-	Índice de Desenvolvimento Humano
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MG	-	Minas Gerais
NASA	-	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	-	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PNMM	-	Pressão ao Nível Médio do Mar
REINDESC	-	Registro de Inundações e Deslizamentos do CEMADEN
RMBH	-	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SMAP	-	<i>Soil Moisture Active Passive</i>
S2ID	-	Sistema Integrado de Informações sobre Desastre
TR	-	Tempo de Retorno
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
ZCAS	-	Zona de Convergência do Atlântico Sul

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVO.....	17
2.1 Objetivos Específicos	18
2. REFERENCIAL TÉORICO	18
2.1 Conceitos gerais sobre desastres naturais.....	18
2.2 Desastres naturais no Brasil.....	21
2.3. Sistemas meteorológicos no estado de Minas Gerais e da Bahia.....	23
2.4. Tempo de retorno	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Região de estudo	25
3.2 Análise histórica dos desastres naturais	27
3.3 Avaliação das características meteorológicas dos desastres dos dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021	28
3.4 Análise do tempo de retorno	30
4 RESULTADOS E DISCUSÃO	32
4.1 Análise do histórico dos desastres naturais entre 2003 e 2022	32
4.2 Estudo de caso dos eventos ocorridos entre 23 e 26 de dezembro de 2021: distribuição espacial dos eventos	38
4.3 Estudo de caso dos eventos ocorridos entre 23 e 26 de dezembro de 2021: análise sinótica	40
4.4 Avaliação da precipitação histórica e determinação do tempo de retorno.....	58
5. CONCLUSÃO.....	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1. INTRODUÇÃO

Os desastres naturais se materializam como resultado da interação conflituosa entre fenômenos naturais extremos e comunidades em estado de vulnerabilidade (Castro, 1998; Kobiyama et al., 2006; Tominaga et al., 2009; Undrr, 2019). Esses fenômenos, no contexto das mudanças climáticas, tendem a ocorrer com maior frequência em todo o globo, especialmente os fenômenos relacionados a eventos climáticos e meteorológicos (Wdr, 2020; Aalst, 2006). É previsto que o aumento da temperatura resulte em uma maior incidência de eventos de precipitação intensa. Na literatura, há muitos estudos que examinam como as mudanças climáticas afetam diferentes tipos de desastres naturais. Ao realizar simulações para vários cenários, podemos entender melhor como a mudança climática impacta eventos de precipitação intensa (Aalst, 2006). Com o aumento projetado de 1,5 °C, regiões que atualmente já sofrem com os desastres, como, por exemplo, a área costeira do Nordeste e as regiões metropolitanas de Belo Horizonte e de São Paulo, terão ainda mais registros de deslizamentos de terra e inundações, devido a maior frequência de chuvas intensas (Marengo et al., 2021). No cenário em que o aumento da temperatura é de 2 °C, a frequência e os impactos dos desastres também aumentam (Marengo et al., 2021). Um estudo recente de Silva *et al.* (2024) mostrou que a Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral norte de São Paulo teve um aumento significativo de precipitação durante a estação chuvosa.

No Brasil, há um grande histórico de eventos extremos de chuva que desencadearam desastres naturais. Segundo o banco de dados do Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil (CEPED) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), entre 1991 e 2021 foram registrados 57.581 desastres, que afetam aproximadamente 10 milhões de pessoas (Ceped/Ufsc, 2023). A Região Sudeste do Brasil, por exemplo, é a segunda região que mais sofre com as adversidades causadas por fenômenos meteorológicos, mesmo representando cerca de apenas 10% do território brasileiro (Ceped/Ufsc, 2023). Os eventos meteorológicos extremos que ocorrem no Sudeste brasileiro tendem a possuir um grande poder devastador em razão da alta densidade populacional, especialmente nas regiões metropolitanas (Amaral; Gutjahr, 2011). Por diversas vezes, eventos emblemáticos ocorridos na região sudeste ficaram em evidência na mídia, como o desastre ocorrido na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro em janeiro de 2011 (Dourado *et al.*, 2012), as inundações na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) em janeiro de 2020 (Dalagnol *et al.*, 2021; Pinto *et al.*, 2023), os deslizamentos de terra na

Baixada Santista em março de 2020 (Freitas *et al.*, 2022), os deslizamentos e enxurradas de Petrópolis em fevereiro e março de 2022 (Alcantara *et al.*, 2023; Oda *et al.*, 2024) e os deslizamentos em São Sebastião em fevereiro de 2023 (Cnnb, 2023).

A região do norte de Minas Gerais e do sul da Bahia fazem parte da região denominada Semiárido, marcada pela irregularidade espaço-temporal das chuvas (Sudene, 2021). Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais de 2013, essas regiões são mais propensas à estiagem e a seca (Ceped/Ufsc, 2013). Diversos estudos apontam como uma das áreas do país mais sensíveis e vulneráveis a desastres relacionados às mudanças no clima (Marengo, 2007; Ambrizzi *et al.*, 2007; Obregon; Marengo, 2007). No caso da Bahia, a seca é o principal fenômeno que atinge o estado, impactando a agricultura e a economia (José *et al.*, 2022). Alguns eventos ganharam maior notoriedade, como, por exemplo, a seca prolongada que atingiu a região Nordeste entre 2012 e 2017 (Aquino; Nascimento, 2020; Marengo; Cunha; Alves, 2016; Medeiros; Oliveira, 2021).

Contudo, a Bahia também tem registros de eventos geohidrológicos. Entre os anos de 1991 a 2012, somaram-se 666 ocorrências de enxurradas, inundações, alagamentos e movimentos de massa (Ceped/Ufsc, 2013). No caso de Minas Gerais, no mesmo período foram registradas 2216 ocorrências de inundações no estado (Ceped/Ufsc, 2013).

Diferente do que comumente ocorre na região Nordeste, em dezembro de 2021 fortes chuvas atingiram o sul do Estado da Bahia e o norte do Estado de Minas Gerais, deixando aproximadamente 86 mil e 30 mil pessoas desabrigadas na Bahia e em Minas Gerais, respectivamente. Somente no estado baiano, o número de pessoas atingidas ultrapassou 850 mil pessoas. Além disso, somando os dois Estados foram registrados 51 óbitos (cnna, 2022; G1a, 2022).

Conforme o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o mês de dezembro de 2021 foi o mais chuvoso ao longo dos últimos 15 anos. Algumas estações meteorológicas registraram recordes de chuva, como a estação de Lençóis–BA que registrou 578 mm em dezembro, sendo 445,4 mm acima da média para o período. Segundo Marengo *et al.* (2023), na Bahia 17 municípios declararam estado de emergência. Estudar esses eventos nesta região, é extremamente importante como forma de produzir um melhor preparo e resiliência na população local e reduzir as consequências desses desastres naturais.

2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo geral avaliar os desastres naturais que ocorrem nos estados de Minas Gerais e Bahia.

2.1 Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar a série histórica de desastres naturais de origem geohidrológica dos estados de Minas Gerais e da Bahia.
- 2) Caracterizar os sistemas precipitantes que culminaram no desastre natural no norte de Minas Gerais e sul da Bahia nos dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021.
- 3) Avaliar o tempo de retorno da precipitação observada nos municípios afetados, caracterizando o evento de dezembro de 2021 com relação a sua recorrência.

2. REFERENCIAL TÉORICO

2.1 Conceitos gerais sobre desastres naturais

Fenômenos tais como deslizamentos de terra, terremotos, inundações e erupções vulcânicas são processos naturais que sempre fizeram parte da dinâmica geofísica da Terra (Tominaga *et al.*, 2009). No entanto, a materialização desses fenômenos em áreas ambientalmente suscetíveis e povoadas por comunidades vulneráveis, caracteriza os chamados desastres naturais (Castro, 1998; Kobiyama *et al.*, 2006; Tominaga *et al.*, 2009; Undrr, 2019). Esses eventos extremos podem ocorrer independente das ações humanas. Contudo, as ações antrópicas aceleram e intensificam esses processos (Carvalho; Galvão, 2006). Embora aconteçam em várias partes do globo, é nos países em desenvolvimento que se encontram a maioria da população em situação de risco (Kobiyama *et al.*, 2006). Por exemplo, entre os anos de 1972 e 2012, mais de 3,3 milhões de óbitos por desastres estiveram concentrados nos países mais pobres, sendo as mulheres e as crianças os grupos populacionais mais vulneráveis (Alcantara-Ayala, 2002; Kobiyama *et al.*, 2006; Freitas *et al.*, 2012).

Nesse contexto, o mesmo tipo de fenômeno pode produzir diferentes impactos a depender do local em que ele ocorre, já que os impactos variam conforme o grau de vulnerabilidade do sistema afetado (Saito, 2011). Segundo Saito *et al.* (2019), a exposição às áreas de risco possui diferentes cenários no Brasil. Isso porque na região Nordeste a cada 100 pessoas, 15 encontram-se em situações de risco. Enquanto isso, a região Sudeste é responsável pelo maior número de pessoas expostas, cerca de 3.647.990 pessoas em 156 municípios críticos. Além disso, 71% dessas pessoas estão concentradas nas regiões metropolitanas de cada estado (Saito *et al.*, 2019).

A exposição ao risco está atrelada à ocupação irregular nos ambientes urbanos, no caso das inundações, a ocupação humana em áreas alagáveis (Luiz; Romão, 2019; Frutuoso *et*

al., 2022). O papel dos rios urbanos foi modificado de fonte de sustento, alimentação e meio de transporte, para portador de problemas ambientais, devido à má exploração de seus recursos e às mudanças em suas características originais. Sendo assim, o ser humano foi capaz de alterar os mecanismos e processos naturais, transformando os desastres naturais em catástrofes urbanas (Pereira, 2017).

As inundações, em sua grande maioria, são deflagradas pela precipitação, mas existem outros fatores que influenciam a magnitude e a frequência desse fenômeno, como: a taxa de infiltração, o grau de saturação do solo e as características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem (Tominaga *et al.*, 2009). É importante ressaltar que as inundações são popularmente chamadas de enchentes, mas enchente ou cheia ocorre quando o nível d'água atinge sua cota máxima após o aumento da vazão (Kobiyama *et al.*, 2006; Amaral; Gutjahr, 2011). Quando o nível da água ultrapassa esse limite, o fenômeno é considerado inundação e atinge a área de várzea e as construções existentes (Amaral; Gutjahr, 2011). Por outro lado, o alagamento ocorre em situações em que há carência no sistema de drenagem urbana, como bueiros entupidos ou a concentração de entulho e lixo nos cursos d'água, fazendo com que a água acumule em determinados locais (Amaral; Gutjahr, 2011). Por fim, a enxurrada é um forte escoamento superficial, que pode ou não estar relacionado a algum córrego, ou rio (Tominaga *et al.*, 2009; Amaral; Gutjahr, 2011). A Figura 1 ilustra de forma clara as diferenças entre a situação normal, enchente e inundação.

Figura 1 - Perfil esquemático de situação normal, enchente e inundação

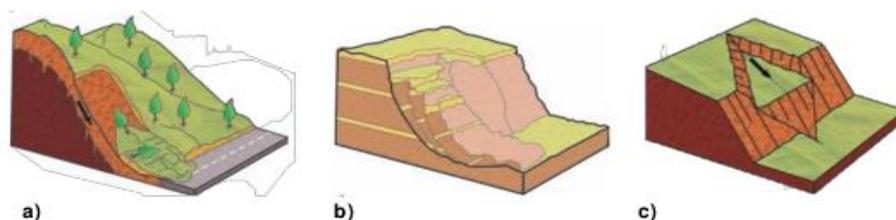


Fonte: Tominaga *et al.* (2009).

Comuns em regiões serranas e montanhosas, os deslizamentos, também conhecidos como escorregamentos, atingem principalmente as regiões Sul, Sudeste e nordeste do Brasil (Tominaga *et al.*, 2009). Esse processo consiste no movimento rápido de massa devido à

ação da gravidade e diversas vezes ocorrem devido a cortes e aterros em locais de alta declividade (Amaral; Gutjahr 2011). Os escorregamentos podem ser subdivididos em três tipos (Figura 2): a) escorregamento translacional ou planar, b) escorregamento rotacional ou circular e c) escorregamento em cunha (Tominaga *et al.*, 2009). O escorregamento translacional ou planar é o mais frequente entre os movimentos de massa, possui curta duração e velocidade elevada, geralmente ocorre após episódios de precipitação intensa, com grande poder de destruição (Tominaga *et al.*, 2009). Em contrapartida, o escorregamento do tipo rotacional ou circular ocorre devido à construção de edifícios, estradas ou pela erosão fluvial no sopé da vertente (Fernandes; Amaral, 1996 apud Tominaga *et al.*, 2009), sendo este o mais recorrente no Sudeste brasileiro (Tominaga *et al.*, 2009). Por fim, o escorregamento em cunha é mais comum em regiões em que o relevo é fortemente controlado por estruturas geológicas (Tominaga *et al.*, 2009).

Figura 2 - Ilustração dos tipos de escorregamentos: (a) escorregamento translacional ou planar, (b) escorregamento rotacional ou circular e (c) escorregamento em cunha.



Fonte: adaptado de Tominaga *et al.* (2009).

Neste contexto, torna-se importante abordar o conceito de risco, pois essa variável está relacionada com o tipo de evento natural, vulnerabilidade do local, exposição e capacidade de resposta (Marchezini *et al.*, 2017). A vulnerabilidade pode ser entendida como o grau de exposição da população aos desastres, incluindo fatores sociais como localização e tipo de moradia, além das condições financeiras. Já a resposta está relacionada com as ações tomadas no pós-desastre e com a capacidade da população de resistir e se recuperar das consequências do desastre (Marcelino, 2008; Isdr, 2004; Saito, 2011).

Sendo assim, se um local possui uma condição natural propícia a deslizamentos, por exemplo, mas não há pessoas expostas ou se possui uma excelente capacidade de resposta, o risco será pequeno. Para exemplificar e quantificar o risco, foi criada uma fórmula que, ao longo do tempo, foi sendo atualizada. No estudo de Marchezini *et al.* (2017) é apresentado o equacionamento do risco para uma determinada região, expresso por:

$$R(e) = \frac{P * V(e) * D}{C} \quad (1)$$

Em que:

R: O risco a que está submetido um determinado elemento (e).

P: Probabilidade de ocorrência de determinado processo perigoso.

V: Vulnerabilidade do elemento (e) em risco.

D: Danos potenciais avaliados.

C: Capacidade de enfrentamento na diminuição da vulnerabilidade e dos danos esperados.

2.2 Desastres naturais no Brasil

Os desastres naturais no Brasil são em sua maioria decorrentes da dinâmica externa da Terra, tais como: deslizamentos, inundações e tempestades (Kobiyama *et al.*, 2006). Episódios de precipitação intensa são altamente destrutivos, pois ocorrem de forma repentina e severa, especialmente quando associados a eventos climáticos extremos. Por outro lado, a precipitação prolongada pode resultar em inundações graduais ao longo do tempo (Marcelino, 2008; Tominaga *et al.*, 2009).

Nas últimas décadas, os desastres naturais têm aumentado em todo o mundo, principalmente após a segunda metade do século XX (Marcelino *et al.*, 2006). Os fatores responsáveis por esse aumento incluem o crescimento populacional, aliado ao aumento da vulnerabilidade e exposição da população a eventos extremos (Marcelino *et al.*, 2006). Contudo, o Brasil enfrenta problemas relacionados aos desastres naturais há muitos anos (Tominaga *et al.*, 2009). Em todo o Brasil, os desastres naturais afetam de forma negativa a sociedade, como por exemplo durante o período de 2001 a 2007 mais de 1,5 milhões de pessoas foram afetadas e os prejuízos socioeconômicos superaram o valor de US\$ 2,5 bilhões (Santos, 2007). Os desastres de origem hidrológicos e geodinâmicos são mais frequentes em diversas regiões. Contudo, a seca é o tipo de desastre que mais afeta o país, em termos de pessoas afetadas e impactos econômicos (Tominaga *et al.*, 2009; Ceped, 2013).

No Brasil, os eventos ocorridos na Região Metropolitana de Belo Horizonte em 2020 afetaram mais de 90 mil pessoas e os prejuízos estimados foram de aproximadamente 1,3 bilhões de reais (Dalagnol *et al.*, 2021). Ainda no ano de 2020 a baixada santista foi fortemente afetada pela precipitação intensa, onde aproximadamente 680 mil pessoas foram afetadas, 47 pessoas ficaram feridas, 17 pessoas foram relatadas como desaparecidas e as

perdas econômicas foram de aproximadamente 200 milhões de reais (Freitas *et al.*, 2022). Na cidade de Recife, a precipitação intensa em maio de 2022, evidenciou o quanto o município está vulnerável às mudanças do clima e aos eventos extremos. Na ocasião, 130 pessoas morreram em decorrência das inundações e movimentos de massa (Marengo *et al.*, 2023). O desastre natural que ocorreu no município de Petrópolis em fevereiro de 2022, foi amplamente noticiado pela mídia. Além da vulnerabilidade e falta de planejamento urbano, a precipitação intensa, somado ao solo já saturado, fizeram com que fossem deflagrados diversos pontos de inundações e movimentos de massa no município, causando 233 mortes e com prejuízos de R\$ 200 milhões (Alcantara *et al.*, 2023; G1b, 2022; Cnnc, 2022). Segundo Oda *et. al* (2024), apesar de Petrópolis possuir instrumentos locais de gestão de risco, o município continua sendo afetado continuamente por desastres naturais.

No estado de Minas Gerais, devido à sua extensão territorial, características geológicas e meteorológicas, é comum ocorrer diversos tipos de desastres naturais, tais como: movimentos de massa, inundações e estiagens/secas. Entre os anos de 1991 e 2012 foram registradas 1052 ocorrências de estiagem/seca e 2216 ocorrências de inundações no estado (Ceped/Ufsc, 2013). No entanto, esses desastres naturais possuem distribuições espaciais distintas. As inundações são mais frequentes nas regiões central, leste e sul do estado, enquanto a estiagem ou seca é mais comum na região norte (Viana, 2015).

O principal fenômeno climático que atinge o semiárido da Bahia, também é a seca e prejudica diversas atividades, como a agricultura e o abastecimento de água (José *et al.*, 2022; José *et al.*, 2020). Durante o período de 1991 a 2012 foram registrados mais de 2600 eventos de estiagem e seca no estado, sendo o Centro sul e Centro norte do estado as regiões mais afetadas (Ceped/Ufsc, 2013). Contudo, também há registros de outros tipos de desastres no estado, como, por exemplo, as enxurradas (468 eventos), inundações (118 eventos), alagamentos (72 eventos) e movimentos de massa (8 eventos). Esses dados são referentes ao período de 1991 a 2012, e torna-se evidente que os eventos de seca e estiagens são mais comuns no estado do que os demais tipos de desastres (Ceped/Ufsc, 2013). A região Centro sul do estado se destaca como uma das regiões mais afetadas. O município de Itabuna, no sul da Bahia, possui extenso histórico de inundações, sendo a inundação que ocorreu em 1967 a mais destrutiva, com registros indicando que esse evento deixou todo o centro da cidade alagado (Hora; Gomes, 2009). Há também o caso de Lajedinho, no centro-sul da Bahia, em 2013, no qual após fortes enxurradas, 17 pessoas faleceram e 600 pessoas ficaram desabrigadas (Globoplay, 2017).

2.3. Sistemas meteorológicos atuantes no estado de Minas Gerais e da Bahia.

Entre os sistemas atmosféricos que atuam na região sudeste, tem-se a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que consiste na organização de uma banda de nebulosidade que persiste por mais de 3 dias, no sentido noroeste-sudeste, ou seja, da Amazônia até o Oceano Atlântico Sul, podendo influenciar norte do Paraná e o centro-sul da Bahia (Carvalho *et al.*, 2004; Quadro, 1994 apud Pedro *et al.*, 2020). Este sistema é formado a partir da interação entre sistemas frontais e tropicais, atuando durante a primavera e o verão. Constituindo assim um importante sistema meteorológico para alimentar os corpos hídricos, que contribuem para a geração de energia e o abastecimento urbano. Por outro lado, a chuva persistente por vários dias pode colaborar para a deflagração de ocorrência de desastres naturais (Reis, 2015).

O regime de precipitação no Sudeste também é influenciado pela ocorrência de frentes frias que são sistemas de escala sinótica formados pelo encontro de duas massas de ar: uma massa de ar quente (massa de ar pré-frontal) e outra fria (massa de ar pós frontal). A massa de ar fria, é mais densa e por esse motivo, adentra por baixo da massa de ar quente, que é menos densa (Varejão, 2006; Nunes *et al.*, 2009). Dessa maneira, o ar quente e úmido sobe, formando uma banda de nuvens organizadas, podendo causar chuvas. A ocorrência de convecção local durante o verão também pode ser responsável pela ocorrência de precipitação intensa. A maior disponibilidade de radiação, nessa estação do ano, favorece o movimento ascendente, o que deixa a atmosfera instável e promove a formação de nuvens convectivas (Pedro *et al.*, 2020).

Entre os sistemas atmosféricos que atuam no Nordeste, com relação a região de estudo pode-se citar a Zona de convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), linhas de instabilidade e as ondas de leste (Ferreira; Mello, 2005). Além da ZCAS e da frente fria que foram explicadas anteriormente.

A ZCIT é um sistema que atua entre as latitudes de 10°N e 5°S, na região de encontro dos ventos alísios. A variação em sua posição depende da temperatura do oceano na região equatorial. Dessa forma, se as águas do Atlântico Norte estiverem mais frias, a ZCIT se desloca mais para o sul, o que resulta em chuvas para o Nordeste (Marengo, 2006). O VCAN se forma sobre o oceano Atlântico e se desloca de leste para oeste. Seu tempo de vida varia de 7 a 10 dias. Este fenômeno pode ser observado através de imagens de satélite como um conjunto de nuvens, formando um círculo que gira no sentido horário. No centro, há

movimentos de subsidência, o que inibe a formação de nuvens. Contudo, em sua periferia, as nuvens formadas provocam chuvas (Gan; Kousky, 1982 apud Ferreira; Mello, 2005). Quando nuvens do tipo cumulus se organizam no formato de linha, tem-se o que é chamado de linhas de instabilidade. Normalmente, essas nuvens são formadas devido a incidência de radiação solar nessa região. Além do mais, a proximidade da ZCIT pode contribuir para o incremento das linhas de instabilidade (Funceme, 2014). Já as ondas de leste se formam no campo de pressão atmosféricas onde sofre influência dos ventos alísios, partem da costa da África e chegam no litoral do nordeste brasileiro, provando chuva principalmente na faixa litorânea desde o Recôncavo Baiano até o Rio Grande do Norte (Ferreira; Mello, 2005). Além disso, durante a fase ativa do fenômeno El Niño Oscilação Sul, conhecida como La Niña, caracterizada pela redução da temperatura no Oceano Pacífico Equatorial, há uma propensão para a convergência de umidade, aumento do escoamento e a consequente ocorrência de chuvas acima da média na região Nordeste (Gianinni et al., 2001; Marengo, 2006).

2.4. Tempo de retorno

O conceito de período de retorno ou tempo de retorno (TR), não se relaciona diretamente a um intervalo de tempo cronológico específico. Em vez disso, o tempo de retorno representa uma medida da tendência central dos tempos cronológicos associados a um determinado evento. Essa medida é calculada como o inverso da probabilidade de ocorrência do evento em questão (Naghettini; Portela, 2011). A equação abaixo (Eq.2) é utilizada para o cálculo do tempo de retorno, onde T é o tempo de retorno e p é a probabilidade de ocorrência de um determinado evento de precipitação. Na hidrologia, o conceito de período de retorno é frequentemente utilizado no estudo probabilístico de precipitações máximas anuais (Naghettini; Portela, 2011).

$$T = \frac{1}{p} \quad (2)$$

O teorema de valores extremos tem sido aplicado em diversas pesquisas de eventos extremos de precipitação (Santos; Lúcio; Silva, 2015; Rodrigues *et al.*, 2020; Rodrigues *et al.*, 2021). Este método foi aplicado no estudo de Santos, Lúcio e Silva (2015) para a Amazônia, os resultados indicam variabilidade no tempo de retorno dependendo da região, por exemplo, na região sul e na costa Amazônica são esperados que pelo menos uma vez

ao ano a precipitação seja maior que 200 mm/dia. Já no noroeste da Amazônia, é esperado que a precipitação diária exceda 170 mm uma vez a cada 10 anos.

No estudo de Rodrigues *et al.* (2020), os autores estimaram o tempo de retorno de eventos extremos de precipitação, utilizando a teoria de valores extremos, em mais de 2000 pontos de grade no nordeste brasileiro para períodos de 2, 5 e 10 anos, associando com desastres naturais ocorridos na região. O estudo indica a região leste do Nordeste como a mais afetada pelos desastres naturais. Os resultados mostram que a cada 2 anos são esperados volumes de chuva superiores a 100 mm em 207 pontos de grade, com destaque para a região metropolitana de Recife.

Rodrigues *et al.* (2021) também abordam o estudo do tempo de retorno como sendo de grande importância para subsidiar a formação de políticas públicas. Neste estudo, o foco foi o município de Natal, no Rio Grande do Norte. Os autores optaram por estimar o nível de retorno e a probabilidade de ocorrência de eventos extremos diários de precipitação a cada mês do ano, através da teoria dos valores extremos. Dessa maneira, os resultados indicam que ocorreram precipitações diárias superiores a 100 mm pelo menos uma vez a cada dez anos nos meses de abril, maio, junho e julho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Região de estudo

A região de estudo deste trabalho abrange o norte do estado de MG e sul da Bahia (Figura 3). Para a elaboração da figura foram utilizadas as mesorregiões de cada estado, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com o intuito de facilitar a visualização da localização das ocorrências de deslizamentos, alagamentos, inundações e enxurradas, as quais também são mostradas no mapa. É importante ressaltar que ao longo do texto a região de estudo foi tratada como norte de Minas Gerais e sul da Bahia.

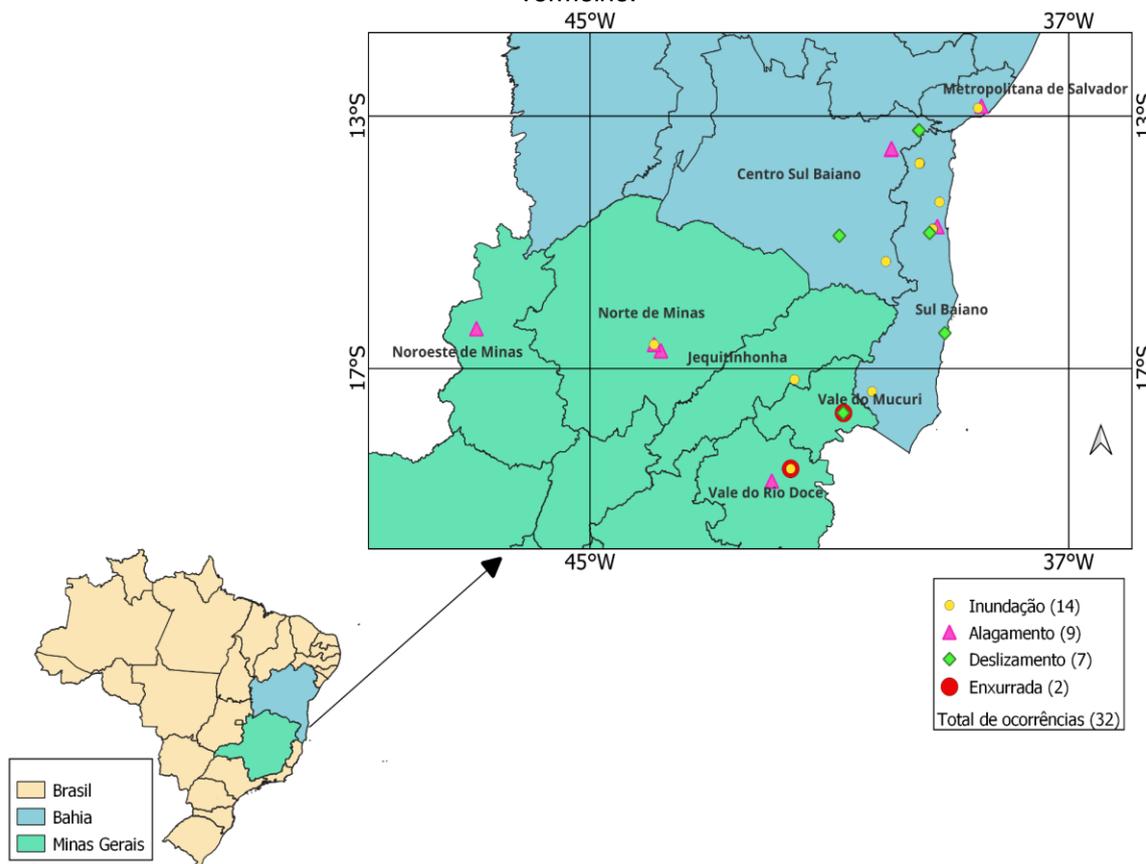
O estado de Minas Gerais está localizado entre as latitudes 14°13'57" S e 22°55'47" S e longitudes 39°51'24" W e 51°02'56" W. A densidade demográfica do estado é de aproximadamente 33,41 habitantes por quilômetro quadrado e o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é de 0,731 (Ibge, 2010). O estado ocupa a quinta posição geral no ranking de produção agrícola, destinando cerca de 44% do seu território para essa atividade (Monteiro; Martins, 2019; Reboita *et al.*, 2015). Conforme a classificação Koppen – Geiger, o clima predominante em MG é o Aw (tropical com inverno seco). Contudo, nas serras do Espinhaço e da Mantiqueira, são encontrados os climas Cwa (temperado úmido com inverno seco e

verão quente) e Cwb (temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente), além dos climas semiáridos (BSh e BWh) no norte do estado (Martins *et al.*, 2018).

Devido à atuação do Sistema de Monção da América do Sul e da convecção local, os totais pluviométricos são maiores no verão (Reboita *et al.*, 2022). No que se refere às temperaturas, MG possui grande amplitude térmica. No inverno austral, o Hemisfério Sul recebe menos luz solar devido à inclinação da Terra, resultando em temperaturas mais baixas. Além disso, essa estação é influenciada por diversos fatores, como latitude, altitude e a presença do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS), levando a mínimas mais baixas em todo o estado. Os picos de temperatura máxima nem sempre ocorrem no verão; em algumas regiões, como oeste e noroeste do estado, podem acontecer na primavera devido à menor nebulosidade. As médias anuais variam conforme a região, por exemplo, no sul de MG a mínima é de 14°C e a máxima de 27°C, enquanto no Noroeste são 19°C e 31°C, respectivamente (Reboita *et al.*, 2015).

Já o estado da Bahia está localizado entre 18°20'07"S e 8°32'00" S e 46°36'59" W e 37° 20' 37" W e possui uma densidade demográfica de aproximadamente 24,82 hab.km⁻² (Ibge, 2010). No que se refere ao clima, o que predomina no estado é o clima tropical. Contudo, o volume de precipitação varia no território baiano. No litoral, os volumes pluviométricos ultrapassam os 1500 mm anuais, enquanto no sertão baiano o volume fica em torno de 363 mm anuais (Ceped/Ufsc, 2013). No que se refere às temperaturas, o Vale do Rio São Francisco, principal bacia hidrográfica do estado que concentra as temperaturas mais elevadas (Ceped/Ufsc, 2013).

Figura 3 - Região de estudo e distribuição dos desastres naturais entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021. São contabilizados os seguintes tipos de desastres naturais (32 ao todo): inundações são indicadas por círculos amarelos, alagamentos por triângulos rosa, deslizamentos por losango verde e as enxurradas círculo vermelho.



3.2 Análise histórica dos desastres naturais

Na fase inicial do trabalho, realizou-se uma análise da série histórica dos desastres naturais ocorridos em Minas Gerais e na Bahia. Essa etapa foi crucial para compreender qual é o tipo de desastre mais frequente na região e como o evento de dezembro de 2021 se encaixa nesse contexto. Para isso, foram utilizadas a base de dados pública do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) e o banco de dados sobre desastres naturais do Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN). O S2iD possui informações de 2003 a 2016, enquanto a base de dados do CEMADEN de 2016 até a atualidade. Ambos os bancos de dados possuem informações como: município afetado, o tipo de desastre, se houve ou não decreto de calamidade pública, entre outras informações. No que se refere aos tipos de desastres, há diferenças entre os dois bancos de dados. Por exemplo, o CEMADEN registra inundações, enxurradas, alagamentos e movimentos de massa, enquanto o S2iD, além dos mencionados anteriormente, registra estiagens, secas, vendavais, chuvas intensas, enchentes e outros tipos de ocorrências, como, por exemplo,

erosão marinha. Vale ressaltar que nem todos os tipos de desastres naturais registrados pelo S2iD foram citados aqui, pois não são o foco deste estudo. É importante salientar que não é apropriado fazer uma comparação direta entre os dois conjuntos de dados, uma vez que se tratam de bancos de dados distintos. Consequentemente, a forma como cada evento é registrado pode variar.

O banco de dados do CEMADEN, chamado Registro de Inundações e Deslizamentos do CEMADEN (REINDESC) é composto por informações sobre ocorrências de desastres naturais em municípios monitorados pelo centro. Para compor este banco de dados, são coletadas informações provenientes de diversas fontes como, por exemplo: informações enviadas pela defesa civil, informações obtidas por meio de noticiários na internet ou televisão, além de informações de redes sociais posteriormente checadas. Já o S2iD é composto por diversos produtos da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil.

A partir desses dados, analisou-se a frequência temporal dos diferentes tipos de desastres naturais na região estudada. Criou-se gráficos mostrando o número total e anual de ocorrências para cada estado, permitindo assim entender como os desastres se distribuem ao longo do tempo e identificar quais tipos são mais comuns em ambos os estados. Sendo possível verificar se houve aumento ou não nas ocorrências ao longo dos anos. Nessa etapa, a análise dos dados foi visual e se justifica para entender se o evento de dezembro de 2021 foi incomum em comparação com o histórico de desastres naturais na região.

3.3 Avaliação das características meteorológicas dos desastres dos dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021

Nesta etapa foram analisadas as características dos sistemas precipitantes que provocaram os desastres em dezembro de 2021. O primeiro passo foi analisar a distribuição espacial dos desastres fornecidos pelo banco de dados do CEMADEN (mesmos dados explicados na seção anterior) que ocorreram entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021.

Em termos do ambiente sinótico, o foco da pesquisa foi identificar quais fenômenos meteorológicos foram os responsáveis pelo extremo de precipitação observado na região. Para isso foram utilizados dados do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), especificamente a quinta geração (ECMWF *Reanalysis* v5 - ERA5) de reanálise atmosférica (dados disponíveis em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>). As reanálises são conjuntos de dados produzidos por modelos numéricos de previsão do

tempo e de clima utilizados para reconstruir o estado atmosférico passado em uma escala global ou regional. Esses conjuntos de dados são gerados combinando observações instrumentais, como dados de estações meteorológicas, boias, satélites e radiossondagens, com modelos matemáticos que representam o comportamento da atmosfera (Dee *et al.*, 2011). Os dados em questão possuem resolução espacial de 25 km e frequência temporal horária. As variáveis obtidas em níveis de pressão (1000, 850, 500 e 250 hPa) foram: componente horizontal do vento (u e v), divergência de massa, temperatura do ar, umidade específica, velocidade vertical, água precipitável e *Convective Available Potential Energy* (CAPE). Além disso, foi utilizado também a carta sinótica da Marinha brasileira, disponibilizada no site da instituição (dados disponíveis em: https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas?field_data_value%5Bvalue%5D%5Bday%5D=24&field_data_value%5Bvalue%5D%5Bmonth%5D=12&field_data_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2021&field_horario_value=12HMG), com o intuito de comparar e confirmar a análise sinótica realizada a partir dos dados do ERA5. Pela falta de disponibilidade de radiossondagens na região de estudo, esse dado não foi utilizado no presente estudo.

Para avaliar a distribuição espacial das nuvens e o ambiente sinótico observado relacionados aos eventos de desastres foram utilizadas as imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental-16* (GOES-16). O GOES-16 possui órbita geoestacionária e opera com cinco sensores. Para monitoramento de nuvens foi utilizado o sensor *Advanced Baseline Imager* (ABI), que possui frequência temporal de 10 min e 16 canais, abrangendo a região do visível e infravermelho do espectro eletromagnético. Foi utilizado o canal infravermelho (Ch13, 10,3 μm), possuindo resolução espacial de 2 km. Os dados são reprocessados e disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (disponíveis em: <http://ftp.cptec.inpe.br/goes/goes16/retangular/ch13/>).

Devido às ocorrências de movimento de massa em diversos locais, é interessante entender e analisar a umidade do solo nos dias anteriores e no dia do evento, visto que este é um fator importante nesse tipo de evento. Para essa análise foram usados dados do *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) (mais informações em: <https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/smap>), um produto de satélite da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) que abrange o globo com uma resolução espacial de 10 km e temporal de 3 dias (Entekhabi *et al.*, 2010). A variável utilizada foi a umidade superficial do solo (mm) e os dados são processados através da plataforma *Google*

Earth Engine (GEE), disponibilizados em: https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/NASA_USDA_HSL_SMAP10K_M_soil_moisture. Foram produzidos mapas espaciais da umidade do solo para os dias dos eventos e a série temporal de outubro de 2021 a fevereiro de 2022 no local dos eventos, para entender o comportamento da umidade do solo antes das ocorrências.

3.4 Análise do tempo de retorno

Nesta etapa, foi avaliado o Tempo de Retorno (TR) da precipitação observada nos municípios da região de estudo. Essa análise é importante para identificar se o evento foi extremo ou não em relação a sua recorrência, e conseqüentemente, a sua direta relação com a ocorrência de desastres naturais (Rodrigues *et al.*, 2021). Para isso, foram utilizados a série histórica de precipitação do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) disponíveis e processados através da plataforma Google Earth Engine (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY). Os dados possuem resolução espacial e temporal de 0,05° e diária, respectivamente, e abrange 50°S a 50°N (e todas as longitudes) desde 1981 até o presente. Foram utilizados o período referente a 1991 a 2020. Os dados do CHIRPS baseiam-se na combinação da precipitação registrada por estações e da precipitação estimada por satélites. A precipitação estimada é obtida por meio de produtos de satélite que utilizam o infravermelho. Esses produtos são da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), da série climatológica da África da Universidade de Reading, e, por fim, utilizam a análise de precipitação multi-satélite da missão de medição de chuva tropical versão 7 para calibrar as estimativas globais de precipitação de duração de nuvem fria (Funk *et al.*, 2015).

Baseado no contorno de cada município em que foi registrado um desastre natural, extraiu-se o valor máximo de precipitação dentro da respectiva área. Posteriormente, foram calculadas a média mensal e o acumulado mensal para toda série histórica para cada município, juntamente com os percentis de 90, 95 e 99%. Adicionalmente, foi efetuado o cálculo do acumulado móvel de 3 dias para toda série histórica, assim como os percentis de 90, 95 e 99% com base nesse acumulado móvel.

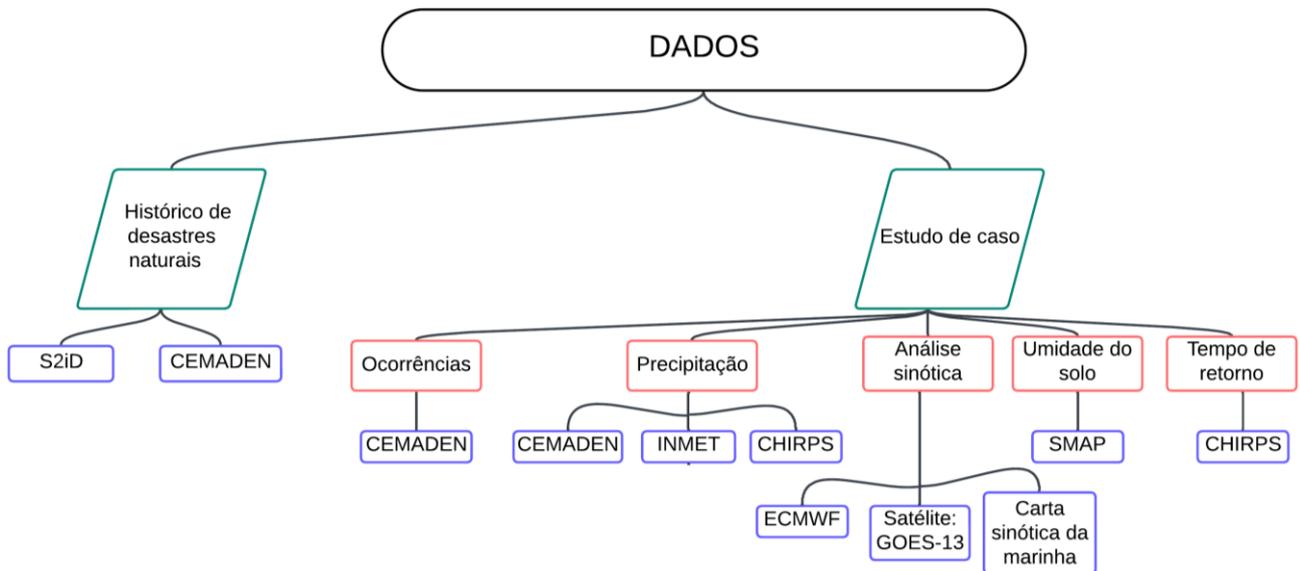
Foram utilizados também os dados dos pluviômetros do CEMADEN, disponíveis em <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#> (acessar *download* de dados e Estações Pluviométricas). O CEMADEN possui um total de 14 pluviômetros próximos das localidades de desastres em MG e 16 em BA, totalizando 30 pluviômetros, todos com resolução temporal

de 10 minutos. No entanto, realizou-se uma filtragem na qual foram excluídos os pluviômetros que apresentavam dados faltantes, restando 28 pluviômetros para análise. Importante ressaltar que alguns municípios não possuem pluviômetros.

Além disso, foi realizado um comparativo entre o acumulado mensal de 2021 e a normal climatológica de 1991-2020 do INMET (<https://portal.inmet.gov.br/normais>). Primeiramente, os dados foram baixados através do site do INMET para os estados da Bahia e Minas Gerais, totalizando 27 municípios na Bahia e 46 em Minas Gerais. Em seguida, foram excluídos os municípios que apresentavam dados faltantes, resultando em 24 municípios na Bahia e 38 em Minas Gerais. Após concluir essa etapa, foi calculado a distância entre os pluviômetros do INMET que têm registros da normal climatológica e os pluviômetros do CEMADEN que registraram os dados de 2021. Foi selecionado para comparação os pluviômetros que estavam mais próximos entre si em termos de distância. Foram escolhidos para comparação os pluviômetros que possuíam a menor distância entre si. Dessa forma, os pluviômetros de Unaí–MG e Vitória da Conquista–BA foram utilizados para a análise, a distância entre os pluviômetros foi de 2,96 km e 3,66 km, respectivamente. Com esses dados, foram gerados gráficos para facilitar a análise e proporcionar uma compreensão mais aprofundada do comportamento da precipitação histórica e do evento em questão.

Para calcular o TR, é necessário ajustar os dados observados a uma distribuição de probabilidade. Embora haja diversos métodos disponíveis, como o método de Gumbel e Log-normal de 2 parâmetros, o método mais utilizado em estudos recentes é a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (Santos; Lúcio; Silva, 2015; Rodrigues et al., 2020; Rodrigues et al., 2021). Neste trabalho, optou-se por utilizar o método de Distribuição de Valores Extremos. O fluxograma abaixo (Figura 4) resume os dados e a metodologia empregados neste estudo.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia aplicada para o atendimento dos objetivos do presente estudo.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do histórico dos desastres naturais entre 2003 e 2022

Segundo o banco de dados S2id no período de 2003 a 2016, o tipo de desastre mais frequente nos estados da Bahia e em Minas Gerais foi a estiagem, com 1944 e 1405 registros, respectivamente (figura não mostrada). Essa ocorrência pode ser atribuída à localização geográfica de ambos, o que influencia suas respectivas condições climatológicas. Embora algumas áreas como o litoral baiano apresentem um volume pluviométrico anual elevado de aproximadamente 1500 mm, o sertão baiano possui um volume pluviométrico que não ultrapassa 400 mm anuais (Ceped/Ufsc, 2013; Reboita *et al.*, 2015). No caso de Minas Gerais, o norte do estado apresenta um clima semiárido, como mencionado por Martins *et al.* (2018). Portanto, essas regiões contribuem para o elevado número de registros de estiagem durante esse período.

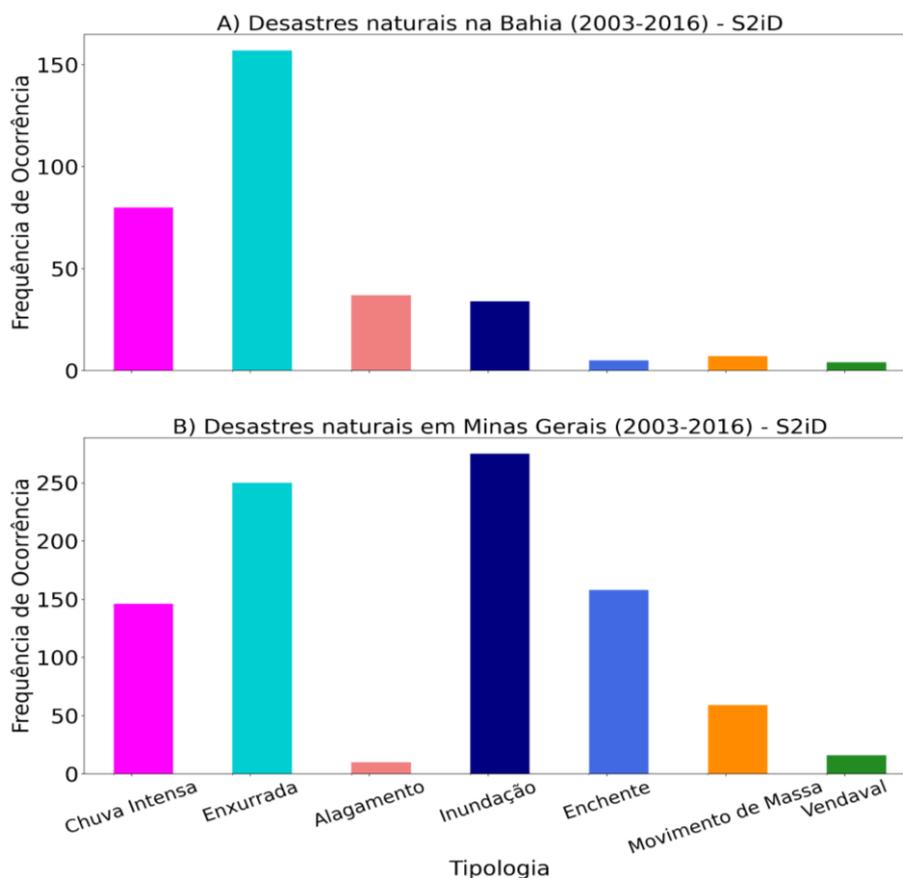
A Figura 5 apresenta a distribuição dos tipos de desastres de origem geohidrológica, ou seja, movimentos de massa, inundação, alagamento e enxurrada na Bahia e Minas Gerais, entre 2003 e 2016. No estado da Bahia (Figura 5A), o tipo mais recorrente é a enxurrada (158), seguido pela chuva intensa (80). Por outro lado, o vendaval apresenta o menor número de ocorrências, totalizando 4 casos. No caso de Minas Gerais (Figura 5B), a inundação (275) lidera o ranking, seguido pela enxurrada, com 250 registros. A enxurrada possui números

expressivos em ambos os estados, este tipo de ocorrência está relacionado com eventos meteorológicos de curta duração e provoca grandes impactos (Ceped/Ufsc, 2013).

A predominância da estiagem é observada em ambos os estados, mas a Bahia se destaca neste aspecto, apresentando mais registros (figura não mostrada). No entanto, quando se trata de eventos geohidrológicos, ou seja, relacionados ao excesso de água e movimentação do solo, há mais ocorrências registradas em Minas Gerais (Figura 5). Essa diferença pode ser atribuída, em parte à localização geográfica e às características fisiográficas de cada estado. Minas Gerais está situado na região Sudeste do Brasil, onde o tempo e o clima são influenciados por diversos sistemas meteorológicos, como frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esses sistemas podem resultar em chuvas intensas e eventos geohidrológicos (Malvestio, 2013). Por outro lado, na Bahia esses sistemas meteorológicos não são tão frequentes, o que contribui para uma menor ocorrência de eventos geohidrológicos nesse estado.

Outra diferença significativa é a quantidade de ocorrências de movimentos de massa. Entre 2003 e 2016 foram registrados 59 eventos desse tipo em Minas Gerais, enquanto na Bahia foram registrados apenas 7 eventos. Nesse caso, além da precipitação, o relevo, a ocupação em áreas de risco e o tipo de solo também são fatores que contribuem para essa disparidade, uma vez que Minas Gerais possui em seu território, relevo acidentado com diversos picos e diversas áreas de risco (Kobiyama *et al.*, 2006; Calderano *et al.*, 2014).

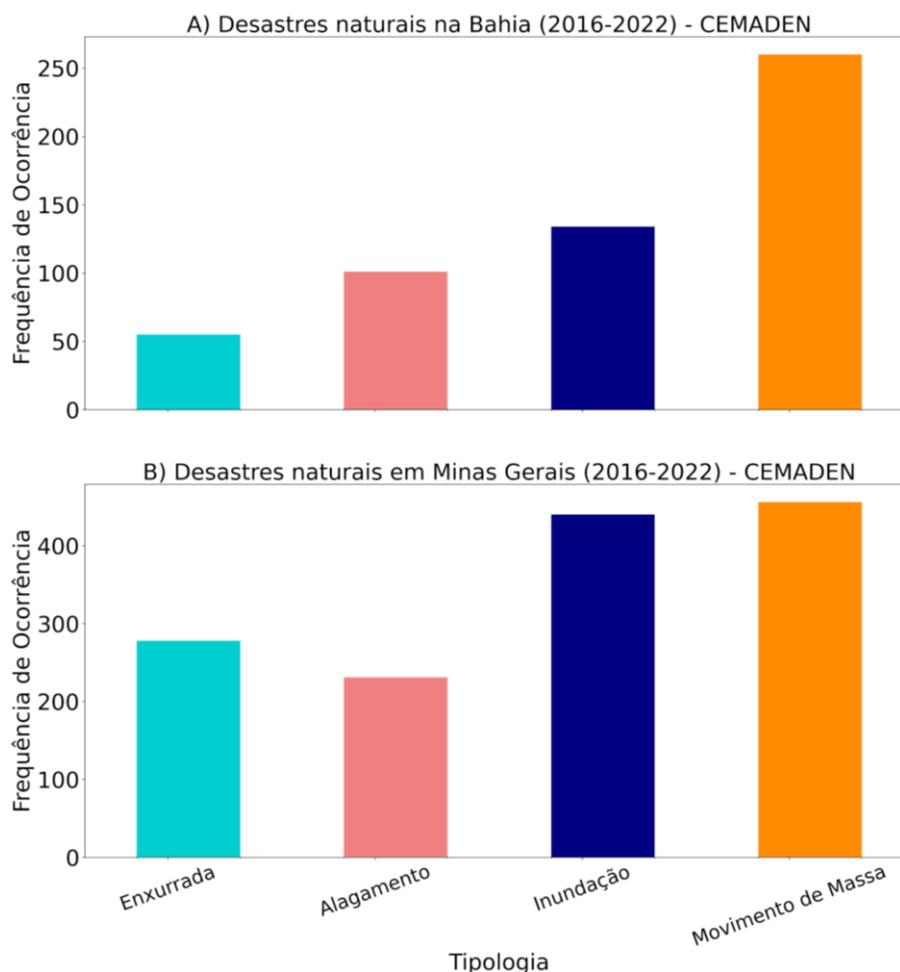
Figura 5 - Distribuição dos tipos (chuva intensa, enxurrada, enchentes, alagamento, inundação, enchente, movimento de massa e vendaval) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2003 e 2016 proveniente do banco de dados do S2iD.



A Figura 6 mostra a distribuição por tipo de desastres naturais na Bahia e Minas Gerais no período entre 2016 e 2022, proveniente do monitoramento realizado pelo CEMADEN. Em ambos os estados, o movimento de massa lidera no número de ocorrências, seguido pela inundação. Nos últimos anos, os dois estados possuem semelhanças em relação ao tipo de desastre mais frequente. Contudo, Minas Gerais sobressai em relação à quantidade de eventos registrados.

A disparidade na quantidade de registros de movimentos de massa entre as Figuras 5 e 6 pode ser atribuída ao fato de que se trata de bancos de dados distintos, isso significa que a forma com que cada banco registra uma ocorrência possui diferenças. Além disso, é crucial observar que a Figura 6 representa um período menor em comparação com a Figura 5. Também tem sido observado nos últimos anos um aumento na ocupação de áreas de risco e na incidência de eventos de precipitação extrema, o que contribui para um aumento nas ocorrências de movimentos de massa. Este fenômeno é destacado no estudo de Marcelino et al. (2006), que aponta esses fatores como influentes no aumento deste tipo de desastre.

Figura 6 - Distribuição dos tipos (enxurrada, alagamento, inundação, movimento de massa) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2016 e 2022 proveniente do banco de dados do CEMADEN.



A análise da distribuição anual de desastres é importante para entender as variações na quantidade ao longo dos anos. A Figura 7a mostra as informações sobre eventos geohidrológicos a partir do banco de dados S2iD. Na Bahia, não houveram diferenças significativas ao longo dos anos, mas foram identificados picos, como os desastres em 2004, com mais de 60 registros, e as enxurradas em 2010, com mais de 50 eventos. Em 2010, ocorreu um pico de enxurradas e chuvas intensas, coincidindo com a fase ativa do La Niña, conforme informações da NOAA. Isso evidencia a influência desse fenômeno nas ocorrências de chuvas no estado da Bahia naquele ano, uma vez que durante os anos de La Niña, o nordeste brasileiro geralmente experimenta chuvas acima da média (Giannini *et al.*, 2001). Sendo assim, este fenômeno pode ter influenciado no número de registros de desastres naturais nesse ano.

Em Minas Gerais (Figura 7b), a distribuição apresenta um comportamento aleatório. Como discutido anteriormente, a localização geográfica e a extensão territorial do estado fazem

com que o mesmo seja influenciado por diversos sistemas meteorológicos que provocam precipitação, agente deflagrador para esses tipos de desastres (Tominaga *et al.*, 2009). Contudo, alguns anos se destacam como 2003 com cerca de 100 registros de inundações, o ano de 2007 com um pico de registros tanto para inundações (67) quanto para enxurrada (67) e o ano de 2012 com 74 registros de enchentes e 68 de enxurradas, e por fim, o ano de 2014 com um pico de chuvas intensas.

Para analisar a distribuição anual por tipo de desastres nos anos recentes, foram utilizados os dados do CEMADEN, os quais são apresentados na Figura 8. Para o estado da Bahia (Figura 8a), os movimentos de massa são destaque em 2020 com cerca de 80 registros e as inundações em 2021 com 69. Neste ano a La Niña estava ativa, fenômeno este que favorece chuvas acima da média na região Nordeste, além disso o prognóstico de primavera de 2021 elaborado pelo INPE e INMET, em diversas regiões havia previsão para chuva acima da média, incluindo o Nordeste (Inmet, 2021; Inmet 2023; Giannini *et al.*, 2001). Sendo assim, a precipitação registrada durante todo o ano, mas principalmente no mês de dezembro (Figura 22 e 23) influenciou o número de desastres geohidrológicos. Por fim, nota-se aumento de registros entre 2019 e 2021. Já em 2022 todos os desastres apresentaram queda no número de ocorrências.

Com relação à Minas Gerais (Figura 8b), o número de registros oscila bastante durante os anos. Destaca-se o ano de 2019 pela baixa nos registros de todos os tipos de desastres. Por outro lado, em 2020 e 2022 se destacam pelo pico de ocorrências de movimentos de massa e inundações. Como discutido anteriormente, não é possível fazer uma comparação direta entre os gráficos provenientes de banco de dados diferentes. Vale ressaltar que existem diversos fatores para que um evento de precipitação se torne um desastre natural e não somente a intensidade dessa variável, como por exemplo, uso e ocupação do solo, vulnerabilidade, condição socioeconômica, além de características geográficas.

Figura 7 - Distribuição anual dos tipos (chuva intensa, enxurrada, enchentes, alagamento, inundação, enchente, movimento de massa e vendaval) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2003 e 2016 proveniente do banco de dados do S2iD.

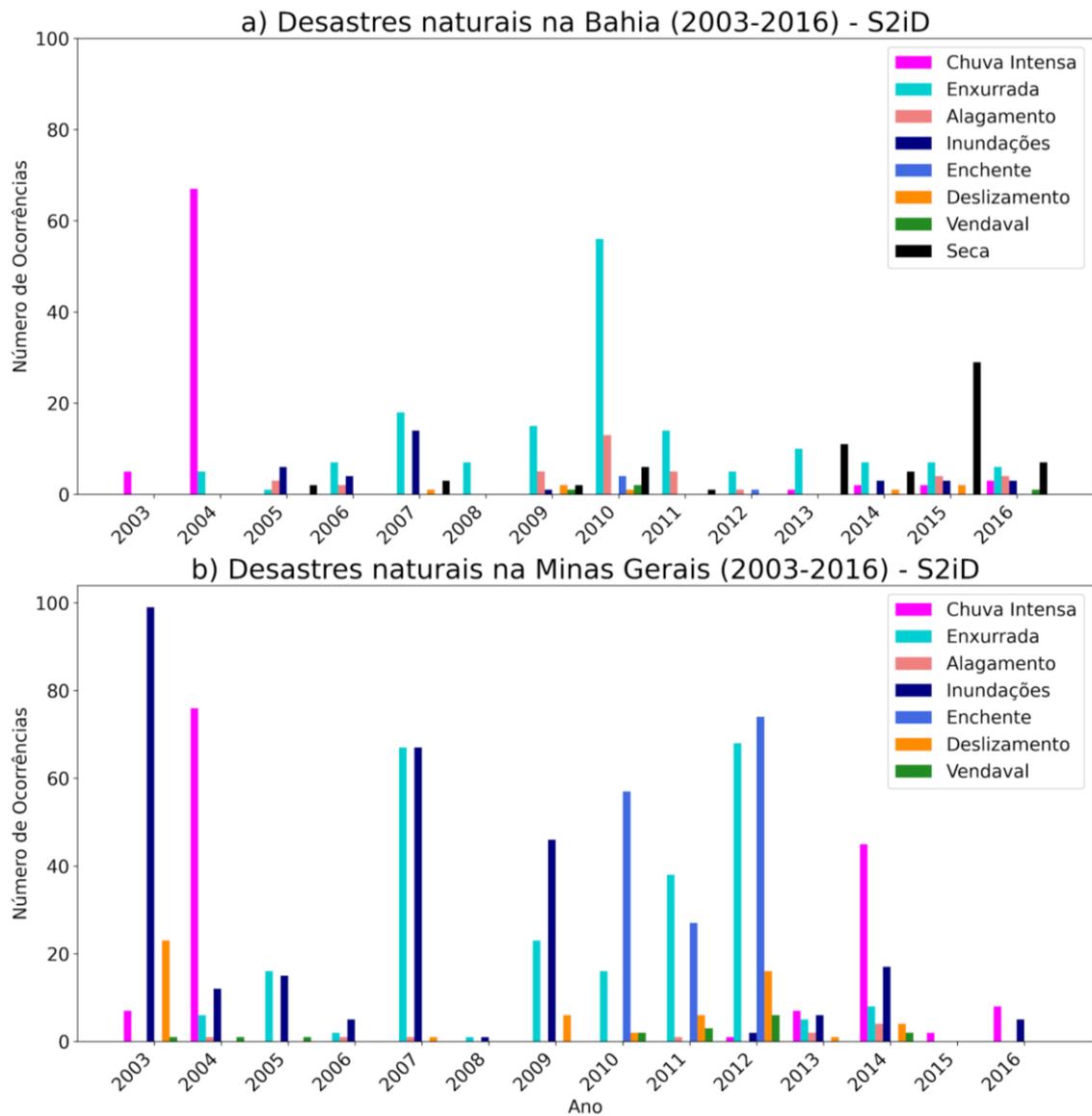
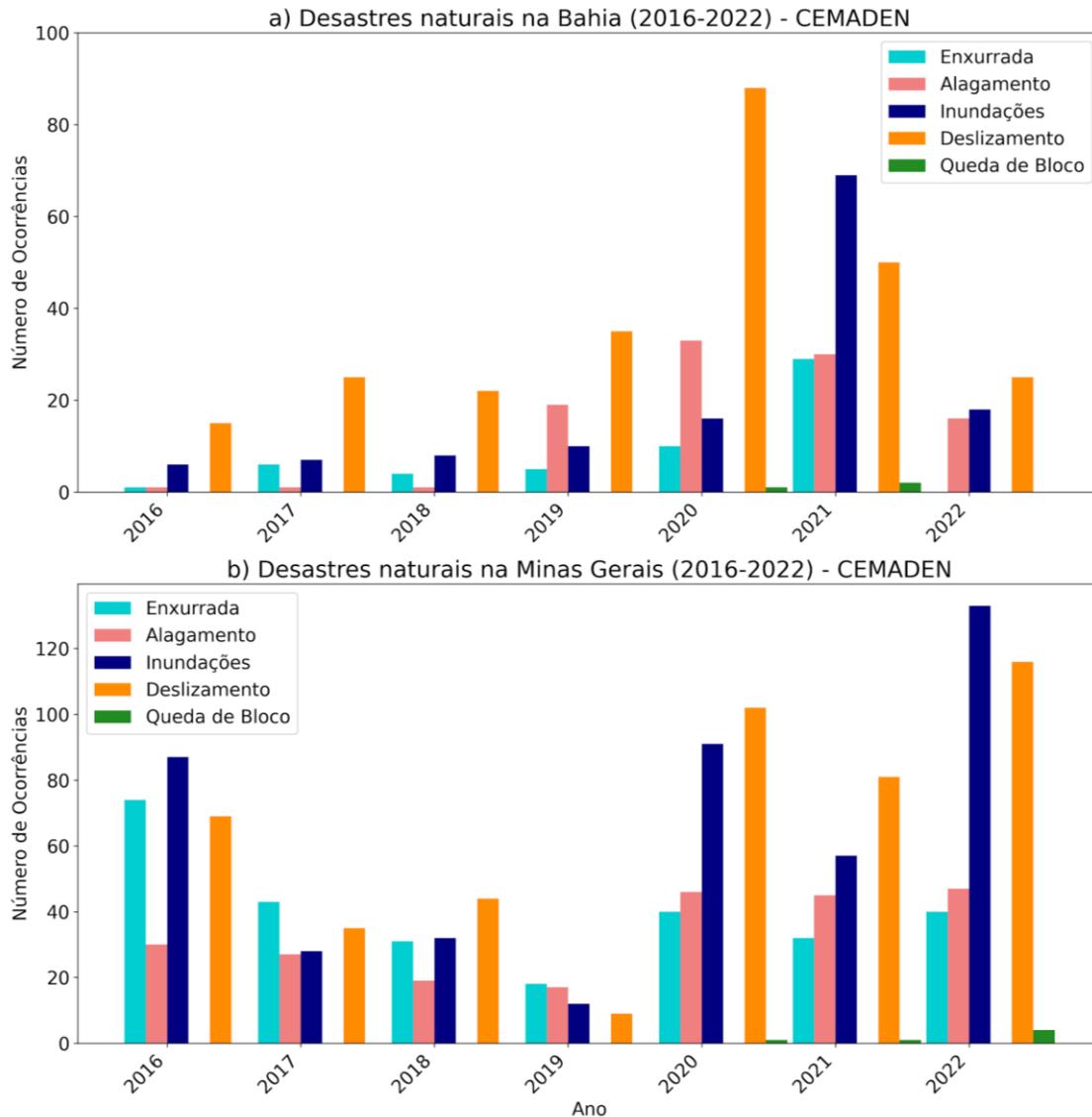


Figura 8 - Distribuição anual dos tipos (enxurrada, alagamento, inundação, movimento de massa e queda de bloco) de desastres naturais na A) Bahia e B) Minas Gerais ocorridos entre 2016 e 2022 proveniente do banco de dados do CEMADEN.



4.2 Estudo de caso dos eventos ocorridos entre 23 e 26 de dezembro de 2021: distribuição espacial dos eventos

Os eventos de precipitação extrema e as ocorrências dos desastres naturais, objeto deste estudo, foram registrados pelo CEMADEN entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021. Diversos municípios foram afetados no Norte de Minas Gerais e sul da Bahia, totalizando 32 ocorrências de desastres. A tipologia mais recorrente foi a inundação, com 14 registros, seguido do alagamento, com 9 registros (Figura 9). Em alguns lugares, mais de um tipo de fenômeno foi registrado (Figura 9). Como é possível observar na Figura 9, os registros de movimentos de massa se concentram nas regiões com inclinação elevada. Os detalhes com

relação à localização exata e o município em que foram registradas as ocorrências estão disponíveis na Tabela 1.

Figura 9 - Mapa de relevo da região de estudo e de localização dos desastres naturais.

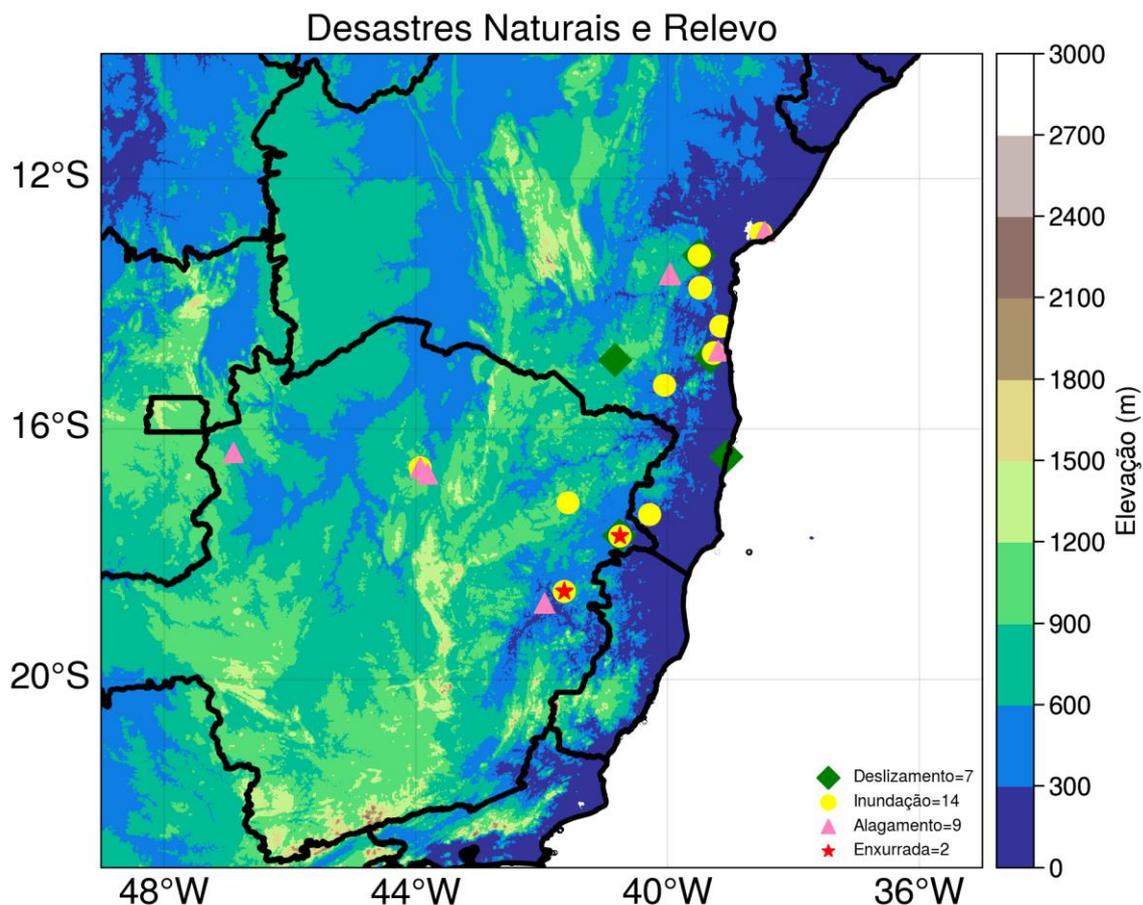


Tabela 1 - Desastres naturais ocorridos entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021 na Bahia e em Minas Gerais. Dados fornecidos pelo CEMADEN.

	Data	Lat	Lon	Município	UF	Tipologia
1	24/12/2021	-13,23	-39,51	MUTUÍPE	BA	Deslizamento
2	25/12/2021	-14,78	-39,27	ITABUNA	BA	Inundação
3	25/12/2021	-14,79	-39,28	ITABUNA	BA	Inundação
4	25/12/2021	-13,75	-39,49	GANDU	BA	Inundação
5	25/12/2021	-13,74	-39,49	GANDU	BA	Inundação
6	25/12/2021	-13,75	-39,50	GANDU	BA	Inundação
7	26/12/2021	-13,53	-39,97	JAGUAQUARA	BA	Alagamento
8	26/12/2021	-13,53	-39,97	JAGUAQUARA	BA	Alagamento
9	26/12/2021	-13,51	-39,96	JAGUAQUARA	BA	Alagamento
10	25/12/2021	-14,75	-39,20	ILHÉUS	BA	Alagamento
11	24/12/2021	-17,36	-40,29	M. NETO	BA	Inundação

12	24/12/2021	-16,44	-39,07	P. SEGURO	BA	Deslizamento
13	24/12/2021	-14,85	-39,33	ITABUNA	BA	Deslizamento
14	24/12/2021	-13,23	-39,50	MUTUÍPE	BA	Inundação
15	24/12/2021	-14,89	-40,83	V. CONQ.	BA	Deslizamento
16	25/12/2021	-14,36	-39,16	ITACARÉ	BA	Inundação
17	25/12/2021	-15,30	-40,06	ITAPETINGA	BA	Inundação
18	25/12/2021	-12,87	-38,51	SALVADOR	BA	Inundação
19	25/12/2021	-12,84	-38,46	SALVADOR	BA	Alagamento
20	25/12/2021	-13,22	-39,50	MUTUÍPE	BA	Deslizamento
21	27/12/2021	-16,72	-43,82	M. CLAROS	MG	Alagamento
22	23/12/2021	-17,17	-41,58	CARAÍ	MG	Inundação
23	23/12/2021	-18,59	-41,65	JAMPRUCA	MG	Inundação
24	23/12/2021	-18,59	-41,65	JAMPRUCA	MG	Enxurrada
25	23/12/2021	-16,62	-43,93	M. CLAROS	MG	Inundação
26	23/12/2021	-16,62	-43,93	M. CLAROS	MG	Alagamento
27	23/12/2021	-18,78	-41,96	G. VAL.	MG	Alagamento
28	24/12/2021	-17,70	-40,76	C. CHAGAS	MG	Inundação
29	24/12/2021	-17,70	-40,76	C. CHAGAS	MG	Enxurrada
30	23/12/2021	-17,70	-40,77	C. CHAGAS	MG	Deslizamento
31	23/12/2021	-17,70	-40,77	C. CHAGAS	MG	Deslizamento
32	24/12/2021	-16,37	-46,90	UNAÍ	MG	Alagamento

De acordo com os sites de notícias G1 (2022) e CNN (2022), no período de ocorrência dos desastres naturais, aproximadamente 86 mil pessoas ficaram sem abrigo na Bahia, enquanto em Minas Gerais o número foi de aproximadamente 30 mil desabrigados. No estado da Bahia, mais de 850 mil pessoas foram afetadas pelos eventos adversos. Além disso, foram contabilizados 51 óbitos nos dois estados.

4.3 Estudo de caso dos eventos ocorridos entre 23 e 26 de dezembro de 2021: análise sinótica

A Figura 10 mostra as condições atmosféricas em altos níveis durante os quatro dias do evento às 18 UTC. Ao analisar a figura, nota-se a presença do jato subtropical próximo a Minas Gerais durante todos os dias. No entanto, no dia 23 (Figura 10a), o jato está mais ao sul, enquanto no dia 26 (Figura 10d) está mais ao norte, sugerindo o suporte deste sistema para o avanço da frente fria em superfície, que apesar de impactar Minas Gerais, está sobre o oceano. Além disso, as linhas de corrente indicam a convergência do vento em altos níveis na região de estudo, principalmente nos dias 23 e 24. A espessura (500-1000 hPa) (preenchido, Figura 11) também indica um cenário propício à presença de um sistema frontal, pois existe um forte gradiente e apresenta uma ondulação semelhante ao dos jatos, também

sobre o oceano. Por fim, a divergência em altos níveis (linha azul, Figura 12) indica o movimento ascendente na atmosfera, característico de um ambiente instável (Figura 13).

A Figura 13 apresenta o padrão de vento em 850 hPa e a distribuição da água precipitável ao longo dos dias do evento. Essas variáveis, bem como as mostradas anteriormente, são relevantes para identificar a presença da ZCAS, que é comum nesta época do ano (Quadro, 1994 apud Pedro *et al.*, 2020). Observa-se que ao longo dos quatro dias, há um escoamento predominante no sentido Noroeste-Sudeste, transportando umidade da Amazônia em direção às regiões Centro-Oeste e Sudeste, embora com algumas variações em sua posição ao longo do tempo. No dia 23 (Figura 13a), esse escoamento está claramente estabelecido, e é possível notar a presença de linhas de corrente girando no sentido horário no Oceano Atlântico, próximo à costa de São Paulo, indicando a presença de baixa pressão associada ao sistema frontal mencionado anteriormente e que também contribui com o transporte de umidade do oceano para o continente. Nos dias seguintes, esse padrão começa gradativamente a dissipar, e o escoamento se desloca mais para o norte de Minas Gerais e sul da Bahia. No dia 26 (Figura 13d), o padrão mencionado anteriormente já se dissipou completamente. Dessa maneira, a frente fria no oceano contribui para a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a região de estudo.

Figura 10 - Jatos 250 hPa (shaded) e linhas de corrente em 250 hPa às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.

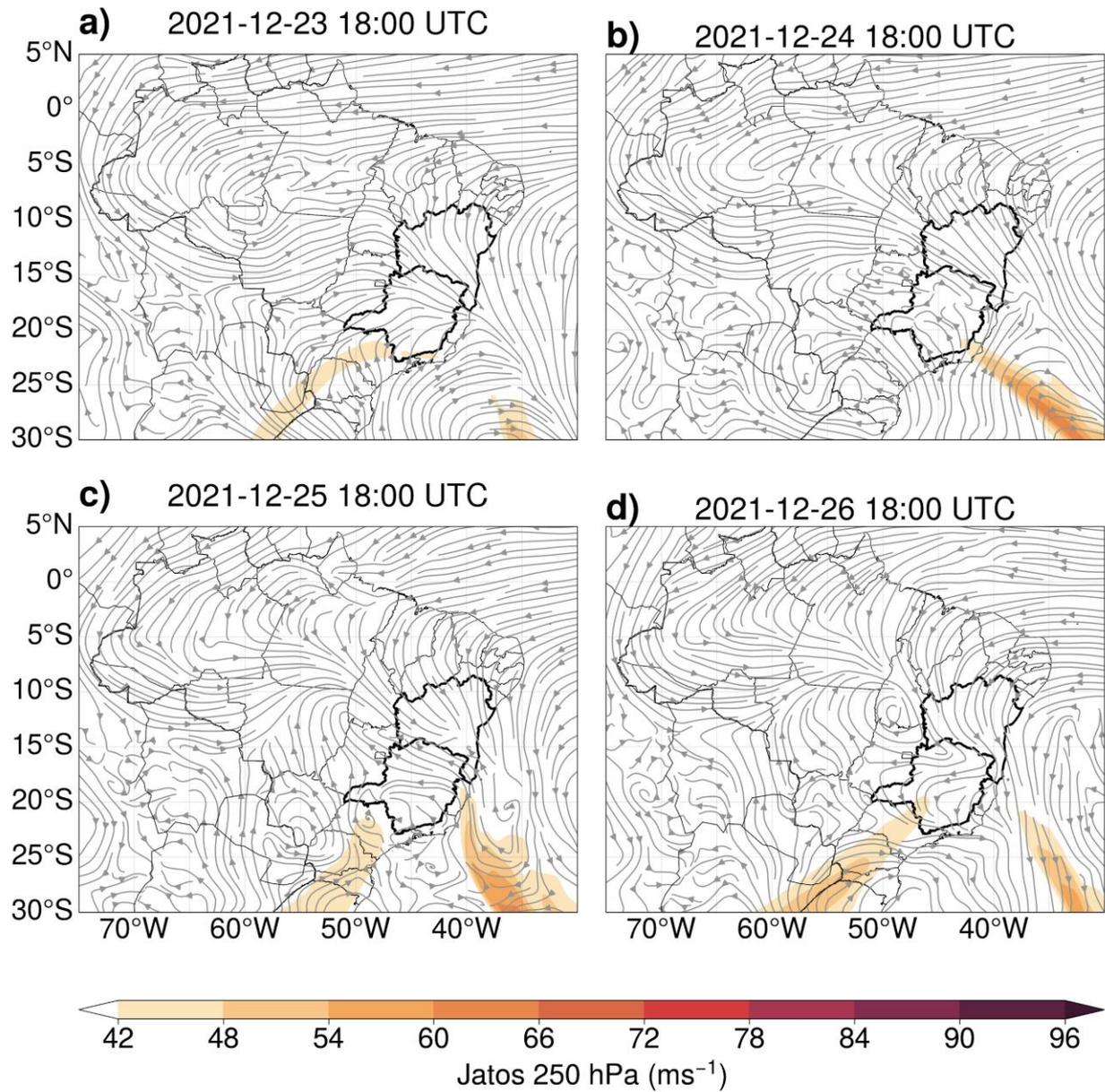


Figura 11 - Espessura 500-1000 hPa (shaded) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.

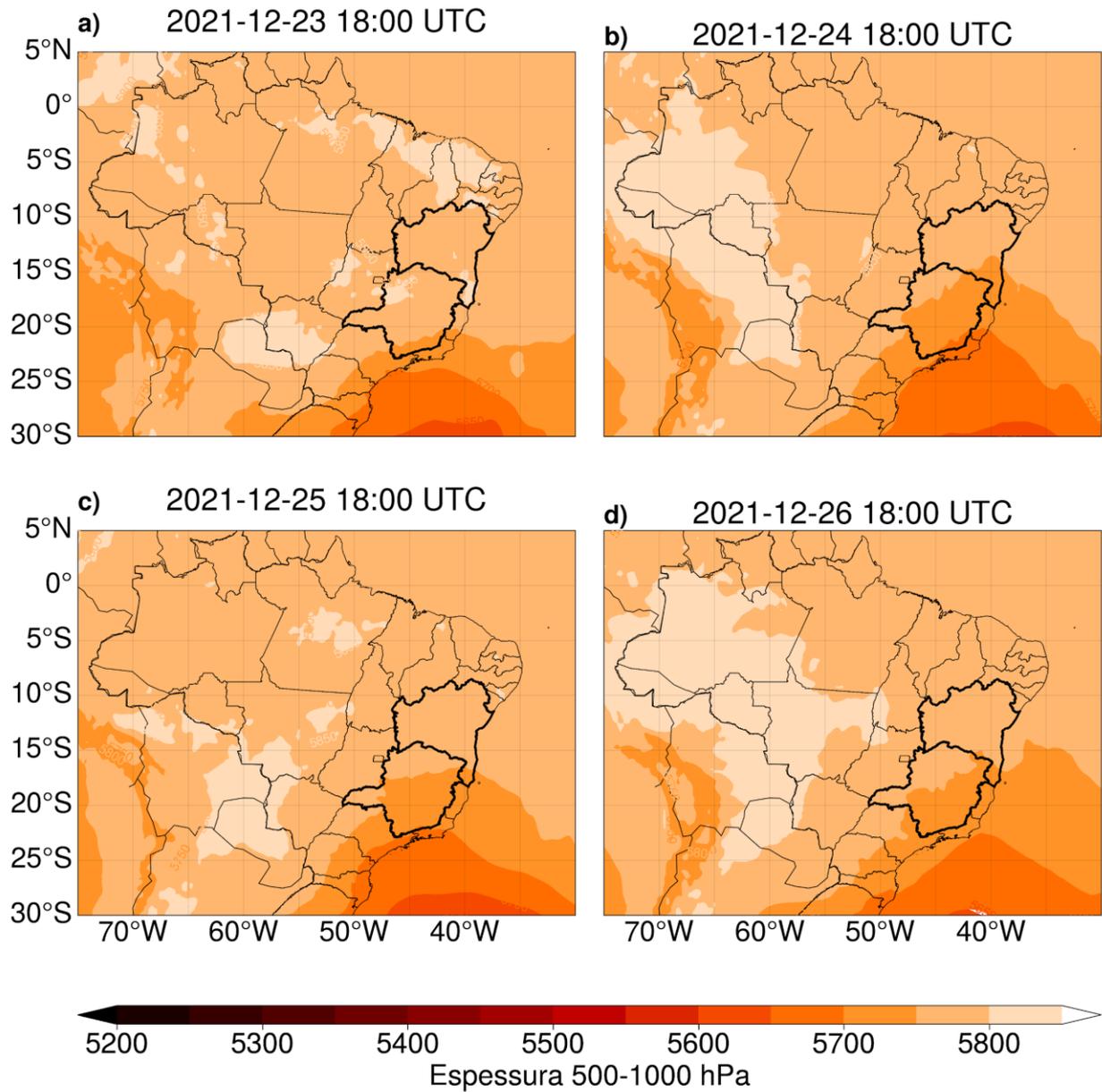
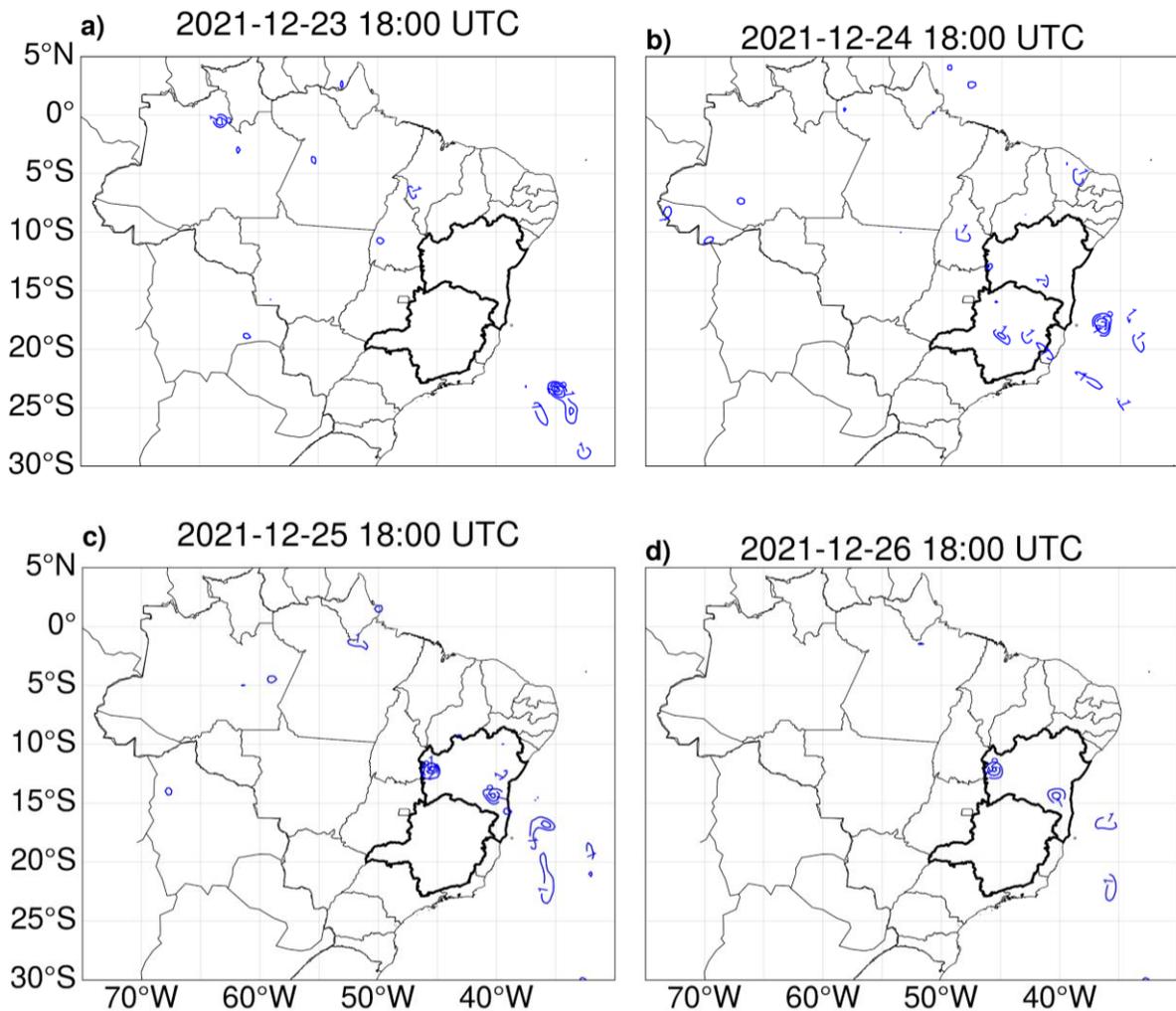


Figura 12 - Divergência 250 hPa (linhas azuis) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.



No que se refere ao ω negativo, a região de estudo apresenta valores negativos de ω durante todo o período (Figura 14). Contudo, é nos dias 23 (Figura 14a) e 26 (Figura 14d) que os valores são mais expressivos. Essa variável é indicativa de uma atmosfera instável, pois quanto mais negativo o ω , mais intenso é o movimento ascendente na atmosfera.

Este cenário está em consonância com o que foi analisado e discutido anteriormente, pois se há divergência em altos níveis (Figura 12), há também movimento ascendente na atmosfera (Figura 14), características típicas de um ambiente instável, favorável à formação de nuvens precipitantes. Além disso, a presença de uma frente fria próxima ao litoral e as características do escoamento e da umidade são fortes indicativos da presença da ZCAS. Esse sistema possui a característica de persistir por quatro ou mais dias, provocando em algumas situações volumes significativos de precipitação na área em que está atuando. Sua

climatologia indica que este sistema pode atuar desde a Amazônia até o estado de Minas Gerais, podendo também afetar o norte do Paraná e o sul da Bahia (Quadro, 1994 apud Pedro *et al.*, 2020).

Figura 13 - Água precipitável (shaded) e escoamento em 850 hPa às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.

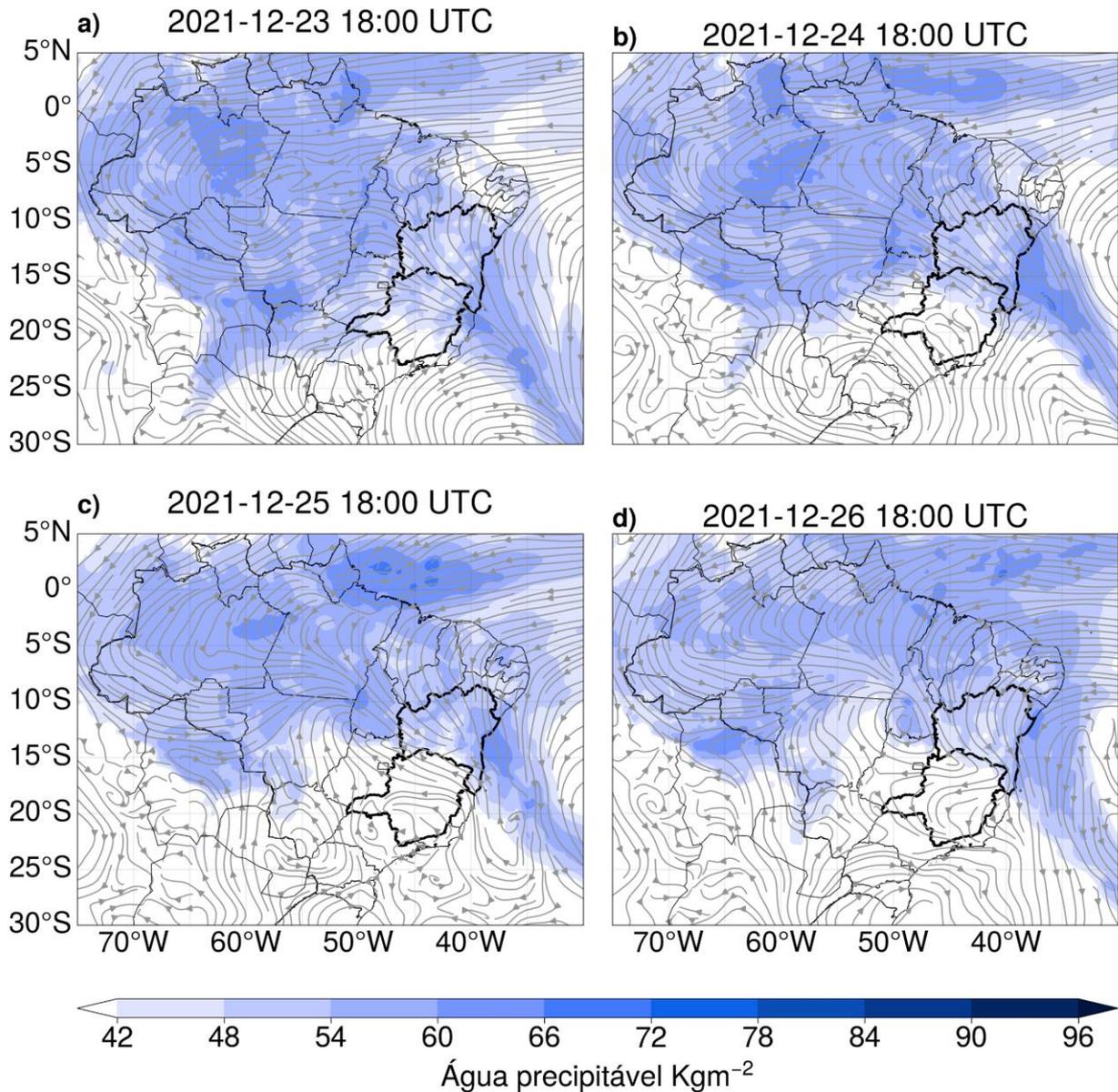
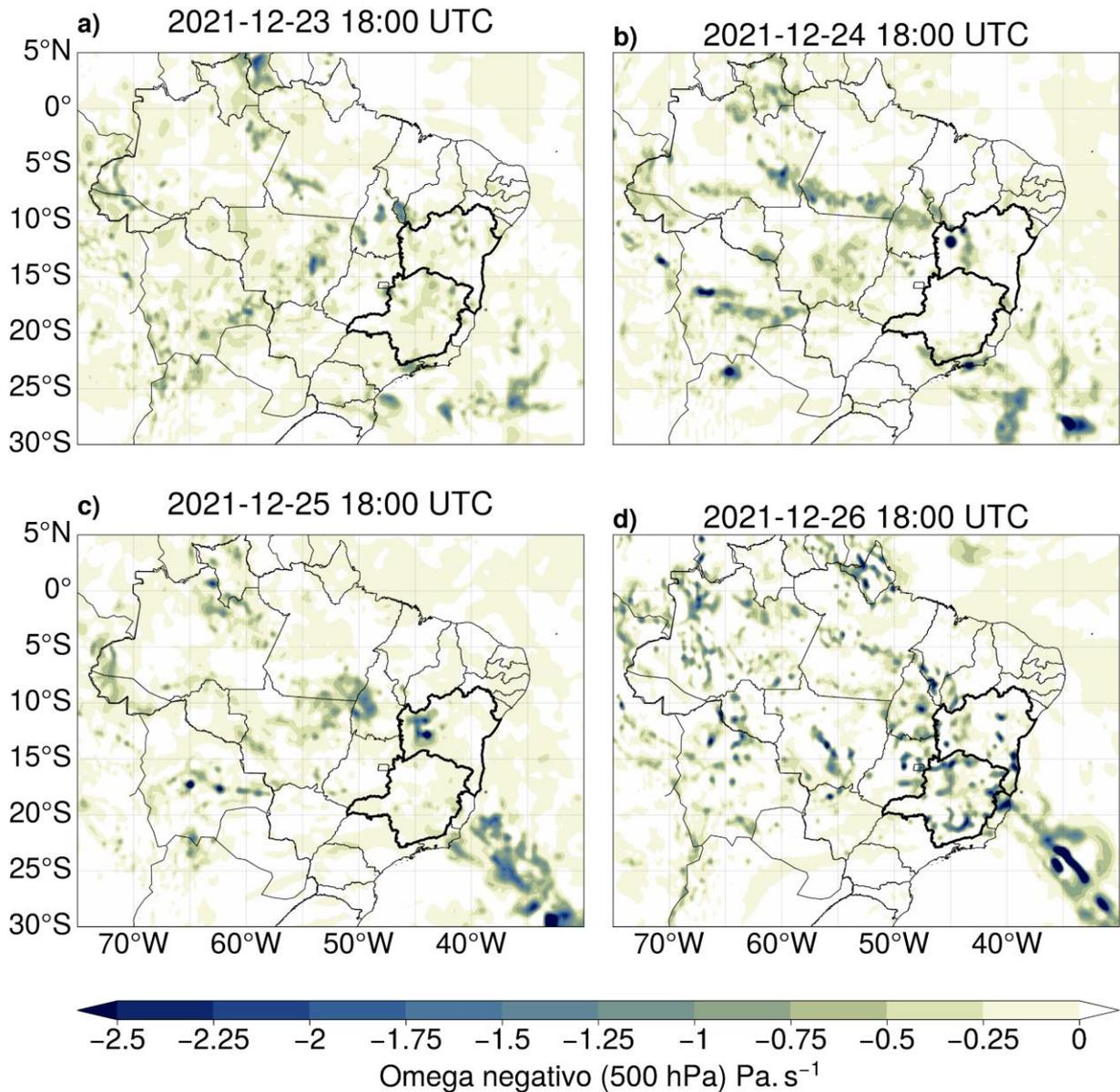


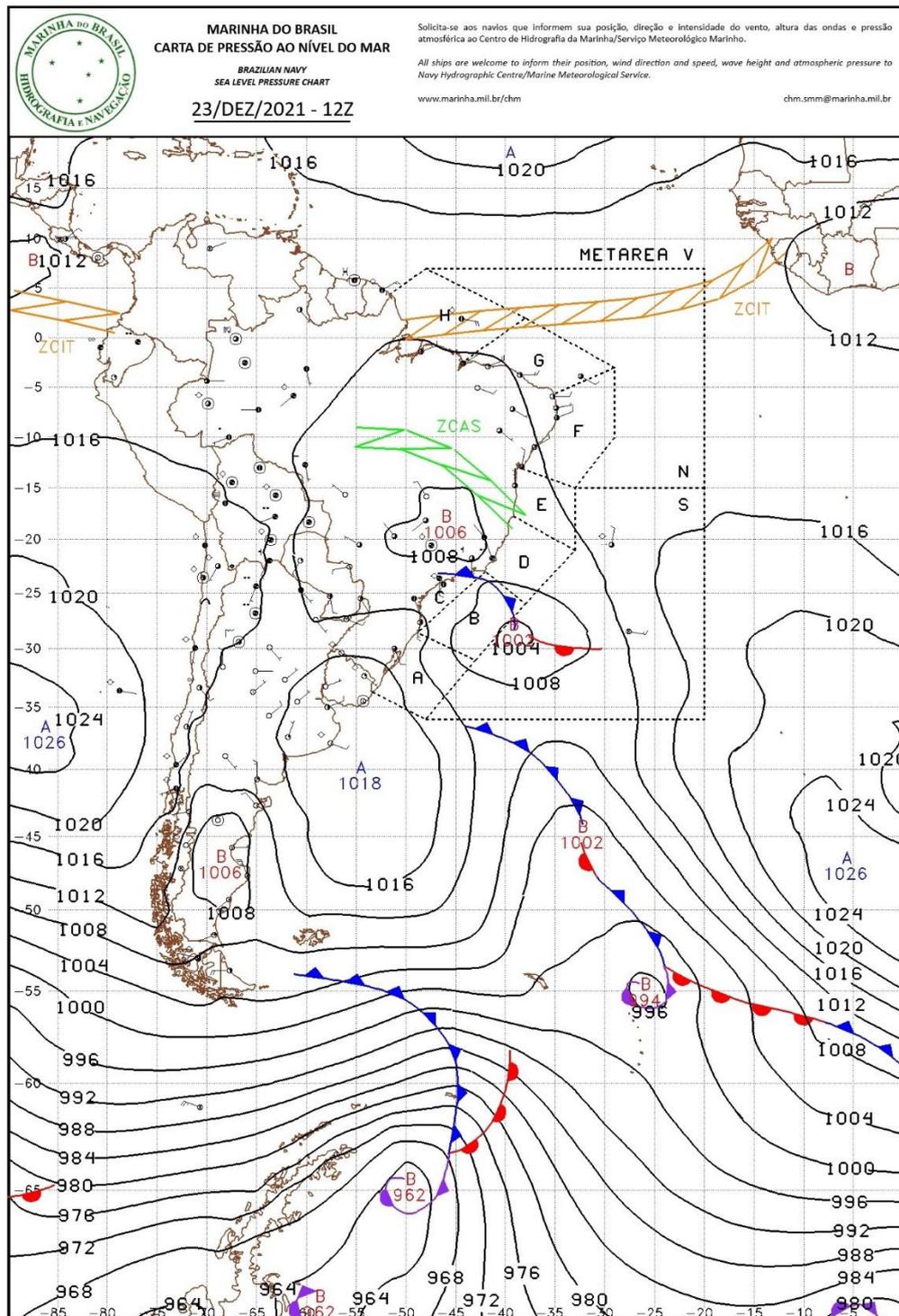
Figura 14 - Valores negativos de ômega a 500 hPa (shaded) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.



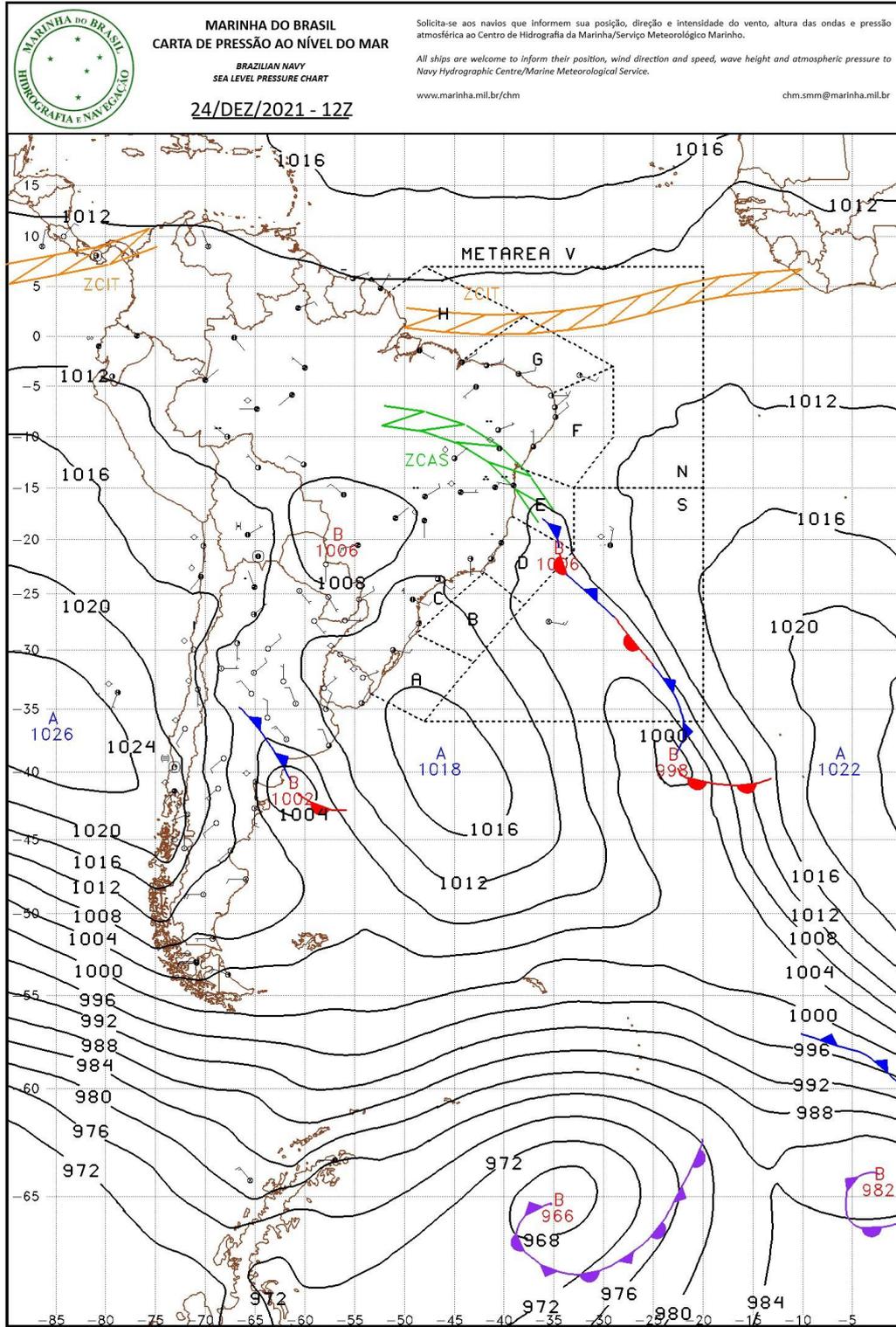
A carta sinótica da Marinha (Figura 15) confirma a presença da ZCAS sobre o território baiano, assim como a existência de uma frente fria no Oceano Atlântico, conforme discutido anteriormente. Observa-se que a ZCAS se forma no dia 23 às 12 UTC (Figura 15a) e gradualmente se desloca para o norte nos dias seguintes (Figura 15 b, c, d). Além disso, no dia 23 de dezembro (Figura 15a), há uma baixa pressão sobre Minas Gerais que contribui para a instabilidade observada nas figuras anteriores e a presença da frente fria no Oceano Atlântico, originada de uma baixa pressão, favorece a canalização de umidade na região, resultando em instabilidade atmosférica e na organização das nuvens de chuva.

Figura 15 - Carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil dos dias 23 a 26 de dezembro de 2021 às 12 UTC.

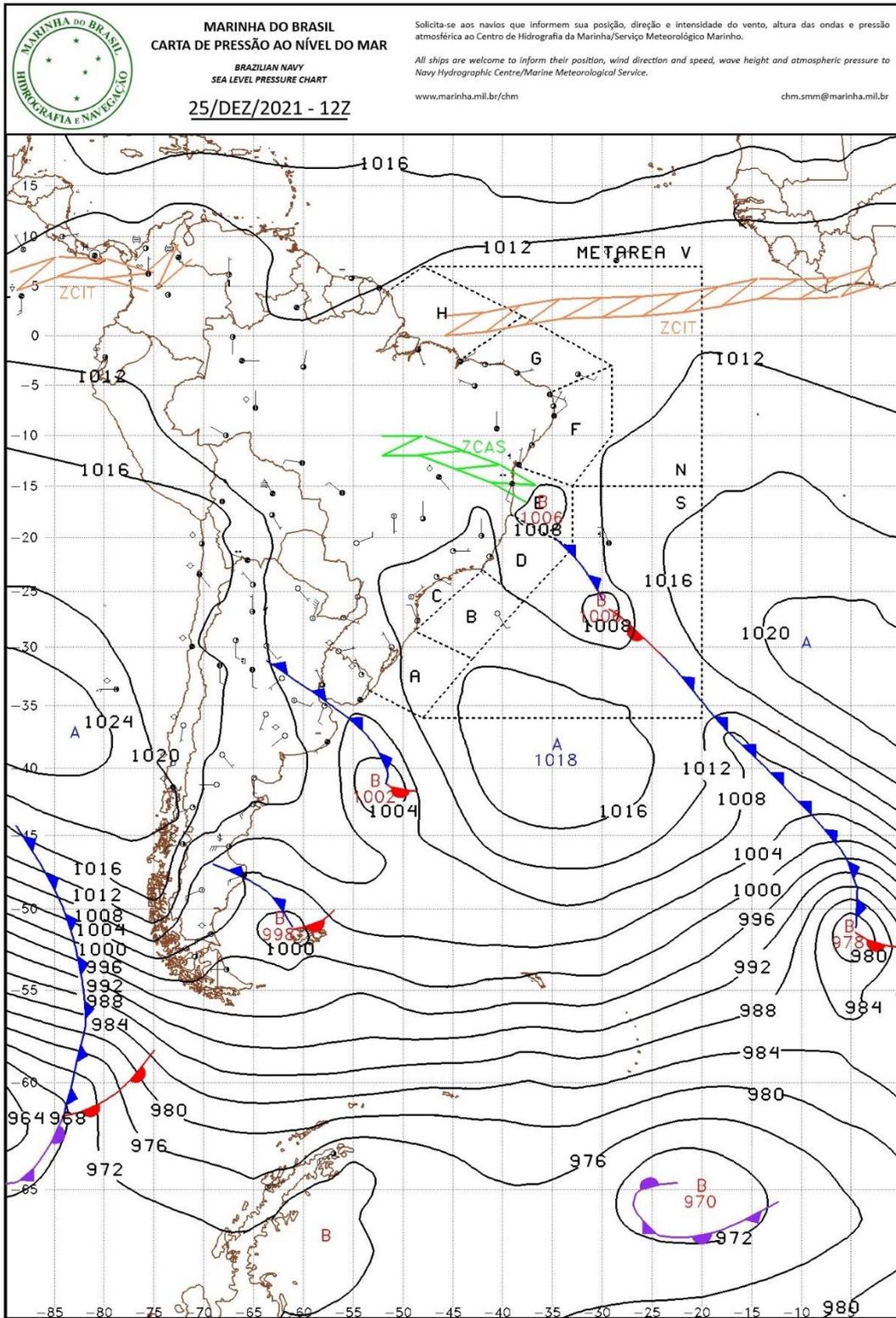
a)



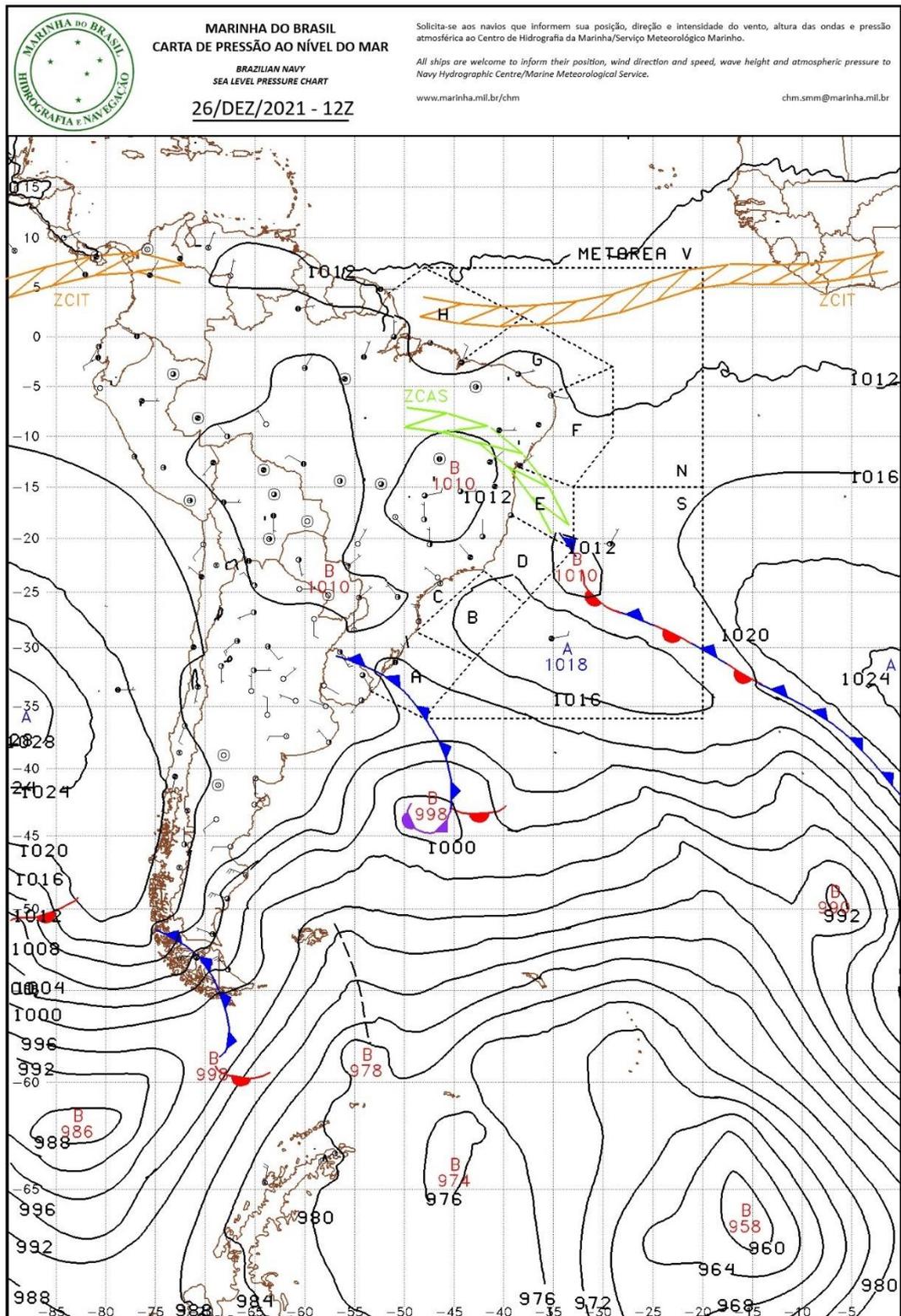
b)



c)



d)



Portanto, as características sinóticas descritas anteriormente são típicas de ocorrência de ZCAS, comum nesta época do ano, que provoca um grande volume de precipitação no local onde está atuando, pois permanece na mesma região por diversos dias. Esse resultado está

em concordância com a nota técnica apresentada pelo INMET após o evento, no qual citava este sistema meteorológico como o deflagrador dos desastres (Inmet, 2021). Importante ressaltar que a região já havia sido afetada semanas antes por duas ZCAS, esses sistemas também provocaram chuva, e conseqüentemente, elevaram os níveis dos rios e aumentaram a umidade do solo. Essas chuvas podem ser observadas através da Figura 24.

Quanto às características termodinâmicas, o CAPE (Figura 16) não apresenta valores elevados (aproximadamente 1600 J/kg no dia 23 de dezembro, Figura 16a), típicos de uma atmosfera instável. Isso indica que o sistema de grande escala teve mais influência do que fenômeno de pequena escala. Por outro lado, o cisalhamento do vento indica instabilidade, a Figura 17 mostra o comportamento do cisalhamento do vento nos 4 dias em que foram registradas ocorrências, e observa-se que em todos os dias o cisalhamento do vento foi superior a 12 ms^{-1} . De acordo com Oliveira *et al.* (2016), essa variável é característica de uma atmosfera instável, uma vez que as correntes ascendentes e descendentes do ar não se anulam, contribuindo para a formação e a manutenção de nuvens convectivas. É possível observar que, assim como nos outros campos meteorológicos mostrados, o cisalhamento do vento mais intenso varia de posição com o passar do tempo, sendo mais ao sul no dia 23 (Figura 17a) e mais ao norte no dia 26 (Figura 17d).

Figura 16 - Convective Available Potential Energy (CAPE, J kg^{-1}) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.

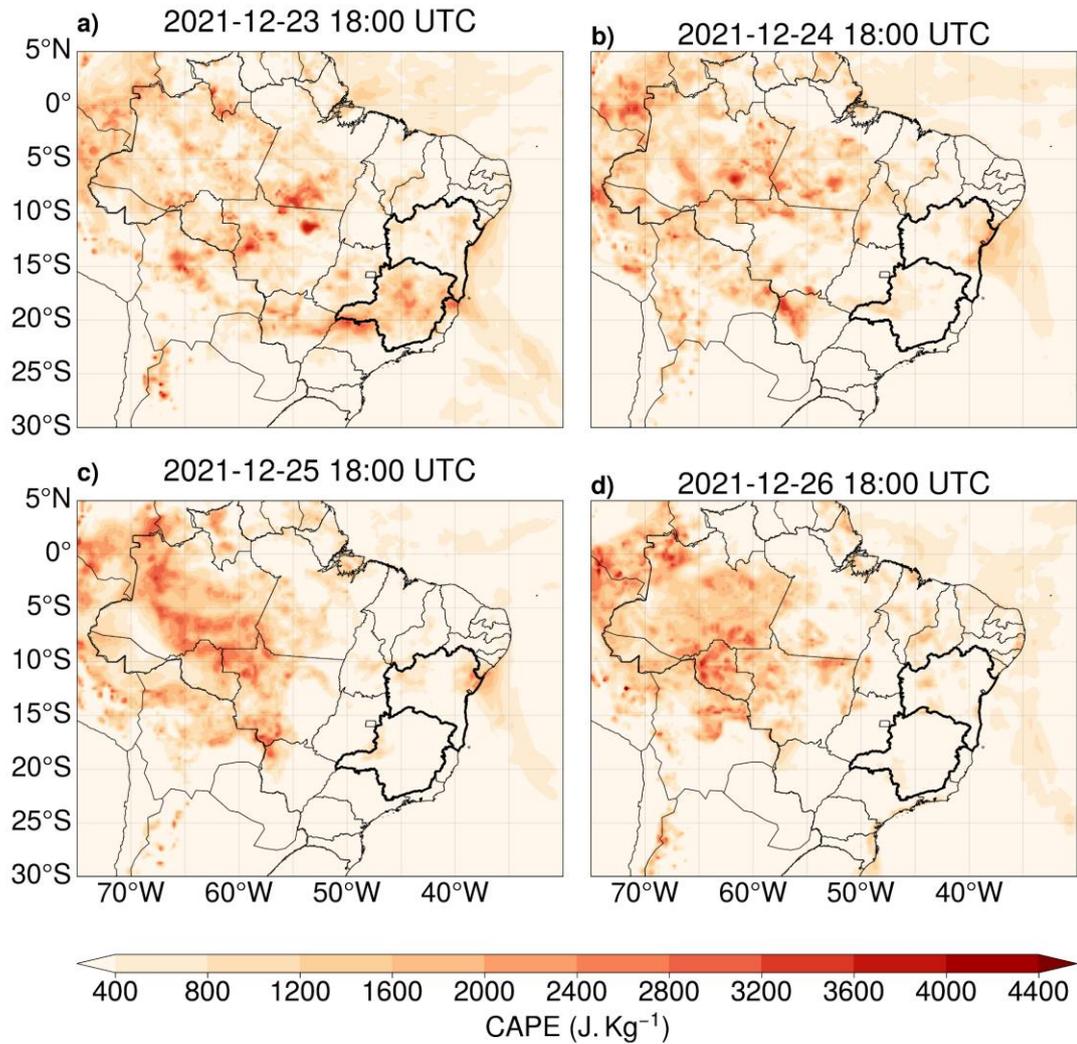
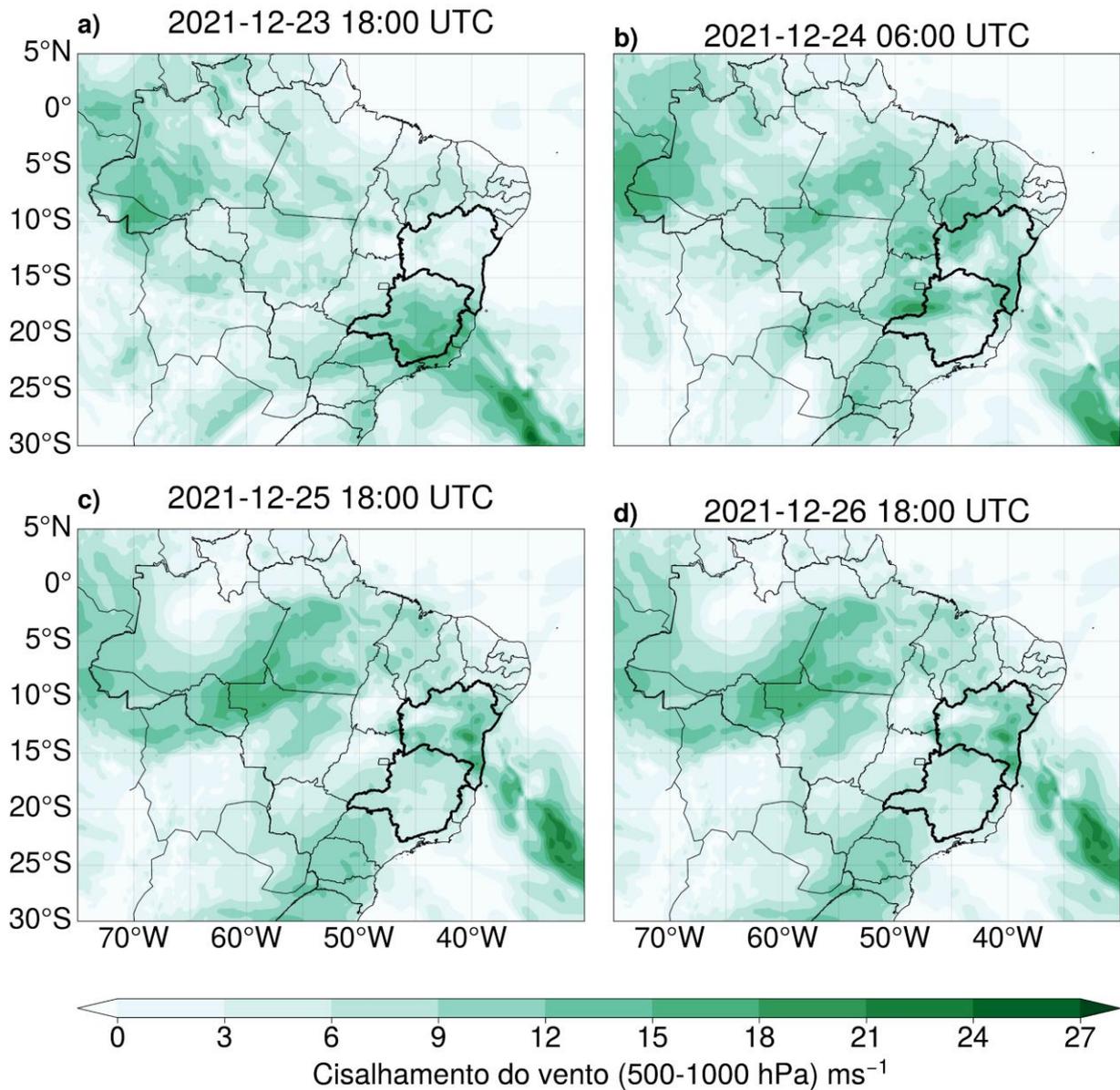


Figura 17 - Cisalhamento vertical do vento de 500 a 1000 hPa (ms^{-1}) às 18Z para os dias: a) 23, b) 24, c) 25 e d) 26 de dezembro de 2021, com dados provenientes do ECMWF - ERA5.



A Figura 18 mostra que às 12 UTC do dia 23 de dezembro de 2021, a região nordeste do estado de Minas Gerais já apresentava a presença de nuvens convectivas, enquanto no estado da Bahia, esse tipo de nuvem se concentrava na região central. Com o passar do dia (Figura 18b e 18c), as nuvens convectivas se espalharam nos dois estados. Destaca-se que às 21 UTC, a temperatura no topo de algumas nuvens sobre o norte de MG e o sul da BA atingiu valores de aproximadamente -70°C , ou seja, são nuvens do tipo Cumulonimbus. Esse tipo de nuvem possui grande extensão vertical e normalmente provoca chuvas em abundância, como foi possível observar através dos dados dos pluviômetros na Figura 25. Nota-se que durante todo o dia 24 (Figura 18d, 18e e 18f), as nuvens convectivas

permanecem sobre os dois estados. Somente no dia 25 (Figura 18g, 18h e 18i) é que as nuvens se deslocam para o norte, concentrando-se na Bahia. Por fim, no dia 26 (Figura 18j, 18k e 18l) as nuvens convectivas se dissipam em praticamente todo território de ambos os estados. Observa-se que há um grande aglomerado de nuvens no sentido noroeste-sudeste por vários dias, indicando mais uma vez a presença da ZCAS na região de estudo.

Na Figura 19, são apresentados os valores de umidade do solo para os quatro dias do mês de dezembro de 2021. Quanto mais escura o azul, maior é a umidade presente naquele solo. Além disso, as ocorrências dos desastres naturais são representadas com ícones variados: losango - deslizamento, círculo - inundação, triângulo - alagamento e estrela - enxurrada. Nesse sentido, observa-se que desde o início do mês, a região do sul da Bahia e norte de Minas Gerais já apresentava solo úmido, e com o decorrer dos dias, a umidade aumentou gradativamente, atingindo o seu ápice no dia 23 de dezembro. Isso sugere que as chuvas no início do mês, influenciadas por episódios anteriores de ZCAS, resultaram em solo úmido desde então. Portanto, a chuva entre os dias 23 e 26 de dezembro, foi o bastante para desencadear as ocorrências registradas pelo CEMADEN.

Figura 18 - Imagens de satélite (GOES-16, CH13 - 10,35 μm) de 23 de dezembro de 2021 às 12:00 UTC a 26 de dezembro de 2021 às 18h UTC.

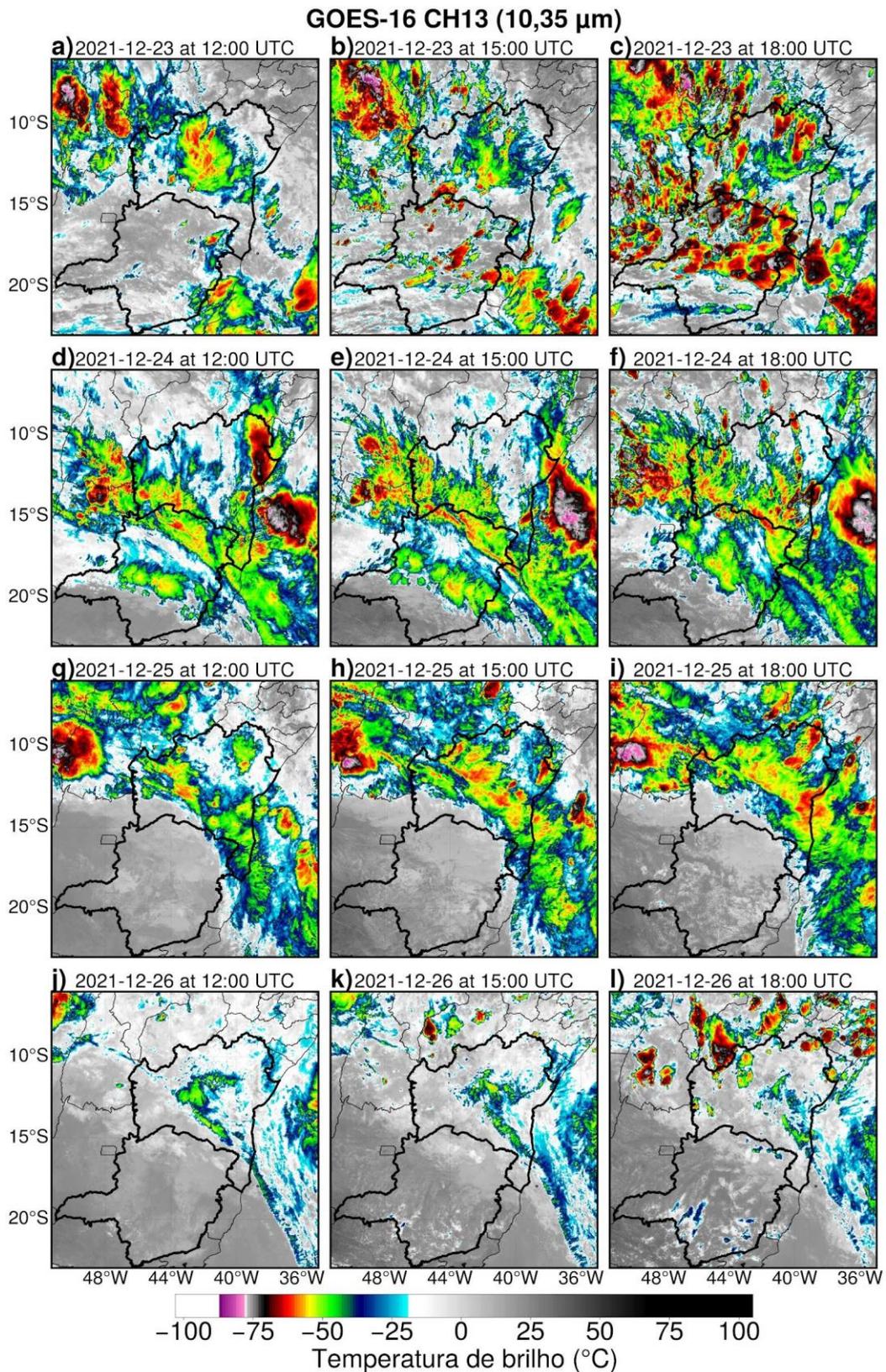
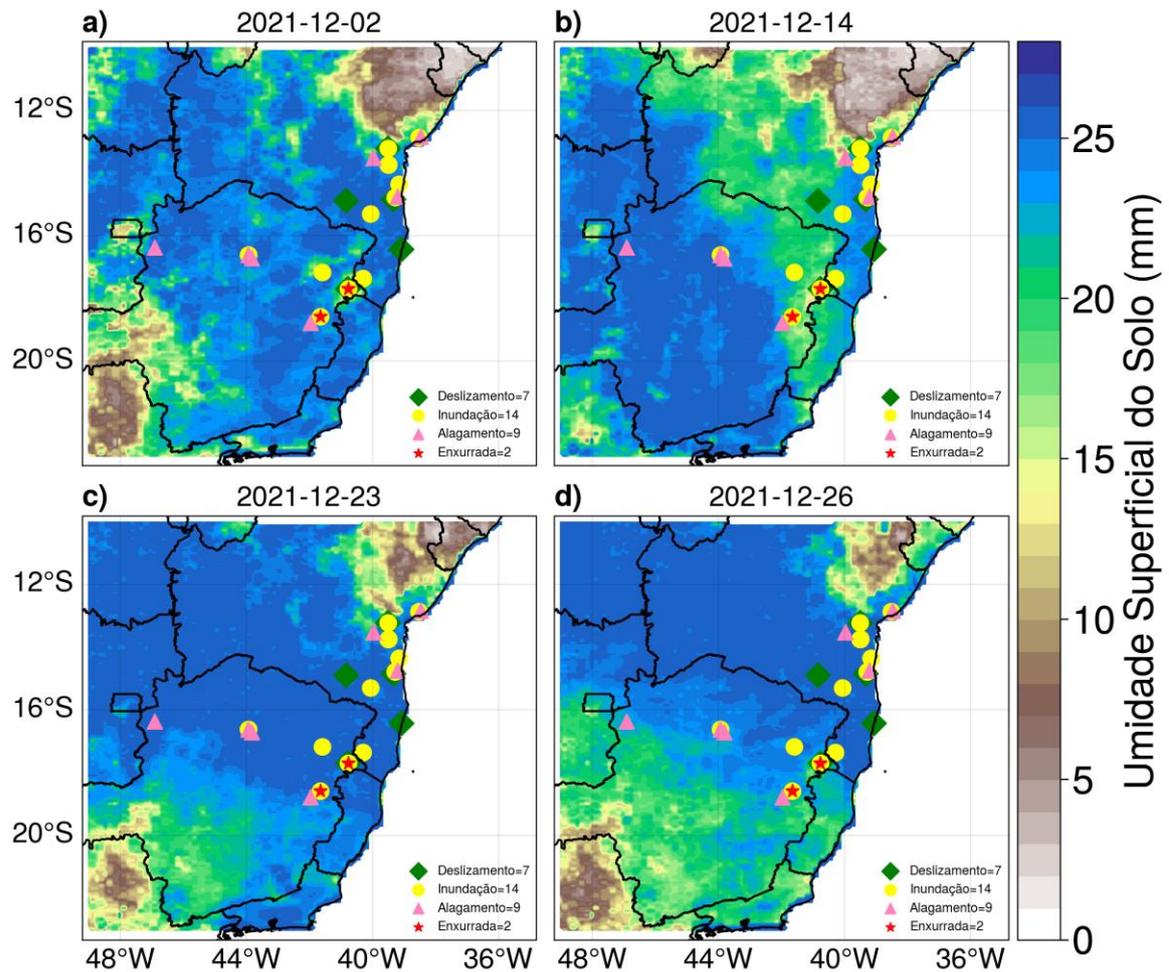


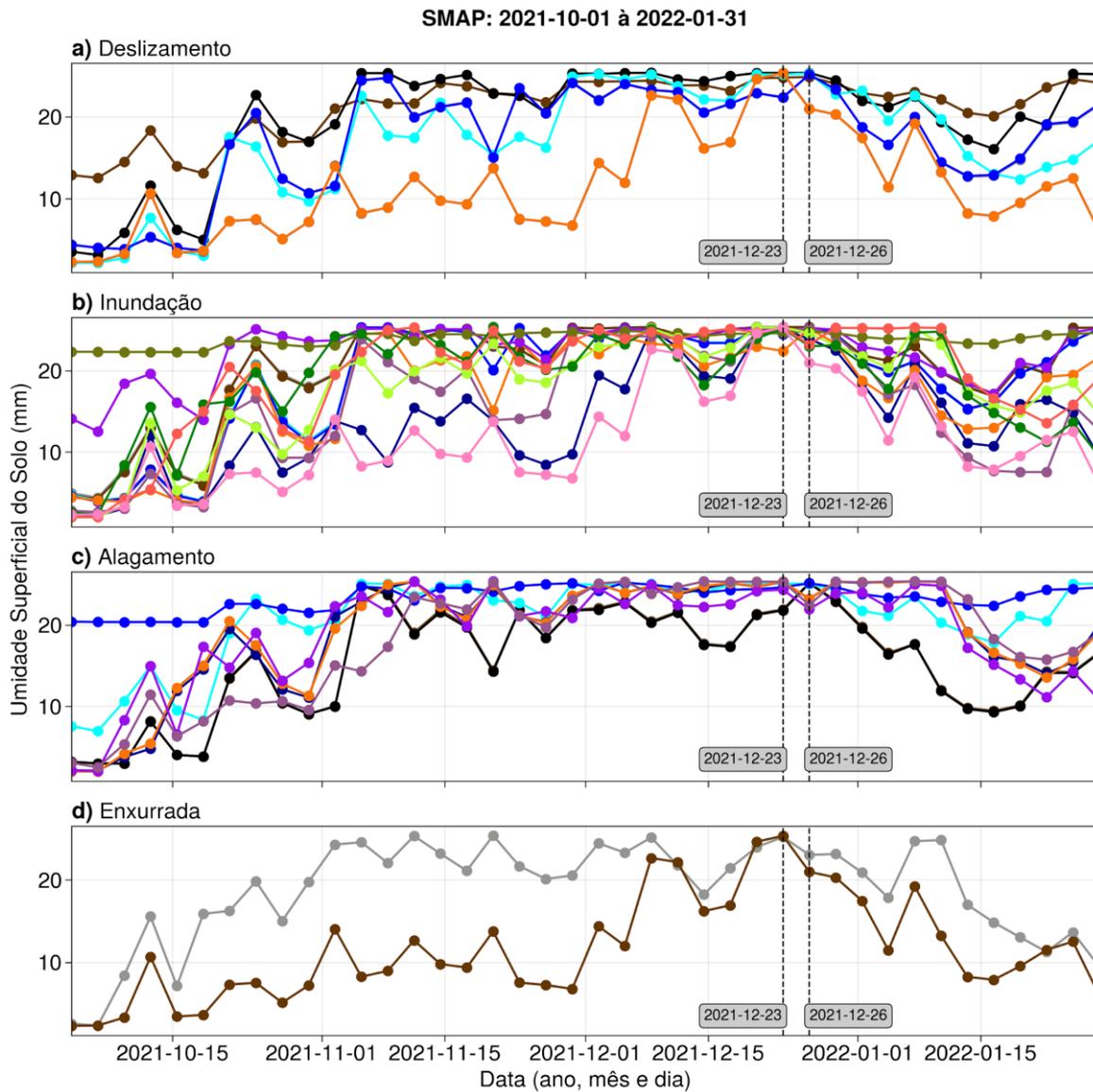
Figura 19 - Umidade do solo a partir de dados do SMAP para os dias: a) 2, b) 14, c) 23 e d) 26 de dezembro de 2021.



Na Figura abaixo (Figura 20), é apresentado o histórico da umidade do solo desde outubro de 2021 até o mês posterior ao registro dos desastres naturais (janeiro de 2022) para cada ponto em que houve algum tipo de ocorrência. Dessa maneira, é possível observar que a partir do momento em que começa a estação chuvosa, meados de setembro, a umidade do solo vai aos poucos aumentando nessas localidades, sendo o ápice nos dias do evento, logo em seguida os valores começam a cair novamente. A Figura 22 corrobora com esse resultado, pois mostra que a partir de outubro diversos municípios em que foram registradas ocorrências, tiveram o acumulado mensal de precipitação superior à média histórica. Isso mostra que as chuvas antecedentes a que desencadeiam as ocorrências também são muito importantes no contexto do desastre, pois deixam o solo úmido, o que favorece o aumento do nível dos rios e a instabilidade de encostas. Com o início do mês de dezembro, com chuvas desde o início do mês (Figura 24), foi inevitável que a chuva mais intensa entre os dias 23, 24 e 25 não causasse transtornos. No entanto, é importante destacar que a chuva é um fenômeno além do controle individual. Porém, o planejamento urbano, que visa

minimizar os impactos de chuvas intensas, pode ser implementado antecipadamente e é de responsabilidade dos governos municipais, estaduais e federal.

Figura 20 - Umidade do solo a partir de dados do SMAP para cada ponto de ocorrência dos desastres, de outubro de 2021 a janeiro de 2022, a) Deslizamento, b) Inundação, c) Alagamento e d) Enxurrada.



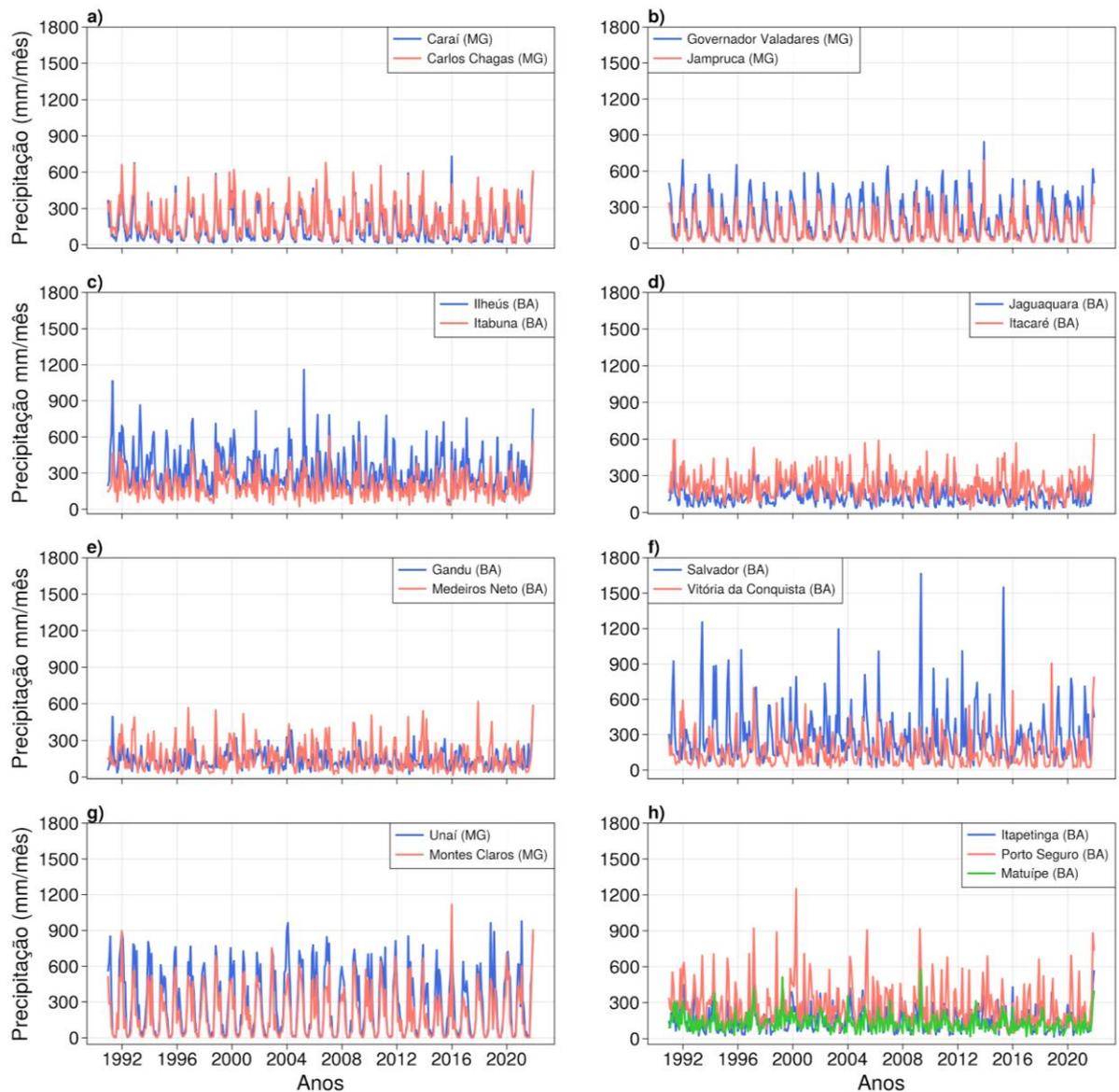
4.4 Avaliação da precipitação histórica e determinação do tempo de retorno

Nesta etapa do trabalho foi realizado uma análise da série histórica de precipitação e calculado o tempo de retorno para os municípios que registraram os desastres analisados nas seções anteriores. A Figura 21 apresenta o acumulado mensal de precipitação do CHIRPS de 1991 a 2021 para cada município onde ocorreram eventos entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021. Observa-se um pico de precipitação no final de 2021, conforme esperado, dado as ocorrências de desastres naturais registrado pelo CEMADEN. No entanto, é possível identificar outros picos ao longo da série histórica, sugerindo que essa região já experimentou grandes volumes de precipitação. Neste estudo, especial atenção é dada aos eventos ocorridos em dezembro de 2021, ano no qual segundo o site da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) a La Niña estava ativa. Sabe-se que em anos de La Niña, a região do Nordeste brasileiro tem chuvas acima da média, quando comparada com a região Sudeste não há padrão característico de mudança de chuva e temperatura (GIANNINI *et al.* 2001). Além disso, conforme a análise sinótica realizada no tópico anterior, a ZCAS foi o sistema atmosférico responsável pelo grande volume pluviométrico.

Ao longo da série histórica, observa-se a ocorrência de picos de precipitação em alguns anos específicos, como em 2000 em Porto Seguro–BA. Em 1996, 2000 e 2009 o fenômeno La Niña estava ativo (Meteorologia-Unifei, 2024). Portanto, pode ter sido um dos fatores contribuintes para o elevado volume de precipitação durante esses anos. Por outro lado, em 1993 e 2003 em Salvador–BA, os resultados apresentaram picos de precipitação, mas o fenômeno estava em sua fase neutra (Meteorologia-Unifei, 2024), não exercendo influência direta na quantidade de chuva. Importante ressaltar que existem outras teleconexões, como a Oscilação de Madden-Julian, que também influenciam a precipitação na região nordeste (Repelli *et al.* 1998).

A Figura 21f-g mostra a existência de uma grande variação nos totais mensais de precipitação. Por outro lado, as Figuras 22a, d, e e mostram que o acumulado de precipitação mensal tem um comportamento mais uniforme. Além disso, há diferenças significativas entre os municípios. Por exemplo, Medeiros Neto–BA registra um pico de precipitação em torno de 600 mm, enquanto Ilhéus–BA atinge aproximadamente 1200 mm e Salvador–BA ultrapassa os 1500 mm. Essas disparidades são atribuídas às características locais de cada município; por exemplo, Salvador, sendo uma cidade litorânea, recebe mais umidade do oceano, o que influencia na formação de nuvens de chuva, além da atuação de sistemas meteorológicos característicos desta região.

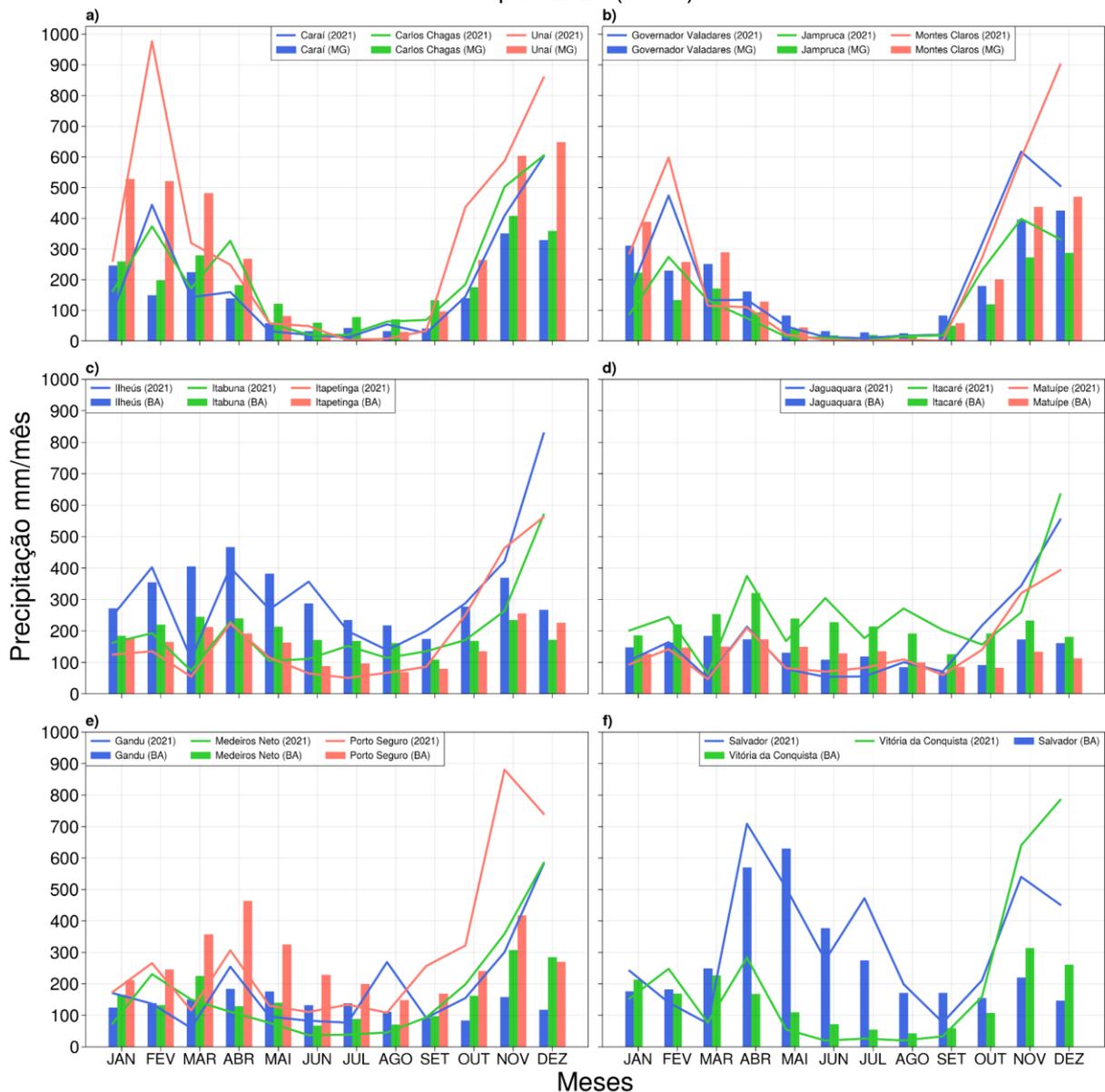
Figura 21 - Acumulado mensal de precipitação do CHIRPS para o período de 1991-2021 para os municípios que registraram desastres naturais.



Na Figura 22, observa-se que em todos os municípios, a maioria da precipitação mensal em 2021 excedeu a média histórica para o respectivo mês, sendo dezembro superior a novembro. Este gráfico é relevante, pois evidencia que já em novembro a precipitação foi superior à média, contribuindo para o aumento dos níveis dos rios e da umidade do solo, como mostrado na Figura 20. Portanto, as chuvas em dezembro afetaram áreas já impactadas por chuvas anteriores, resultando nos eventos registrados pelo CEMADEN nos dias 23 e 26 de dezembro de 2021.

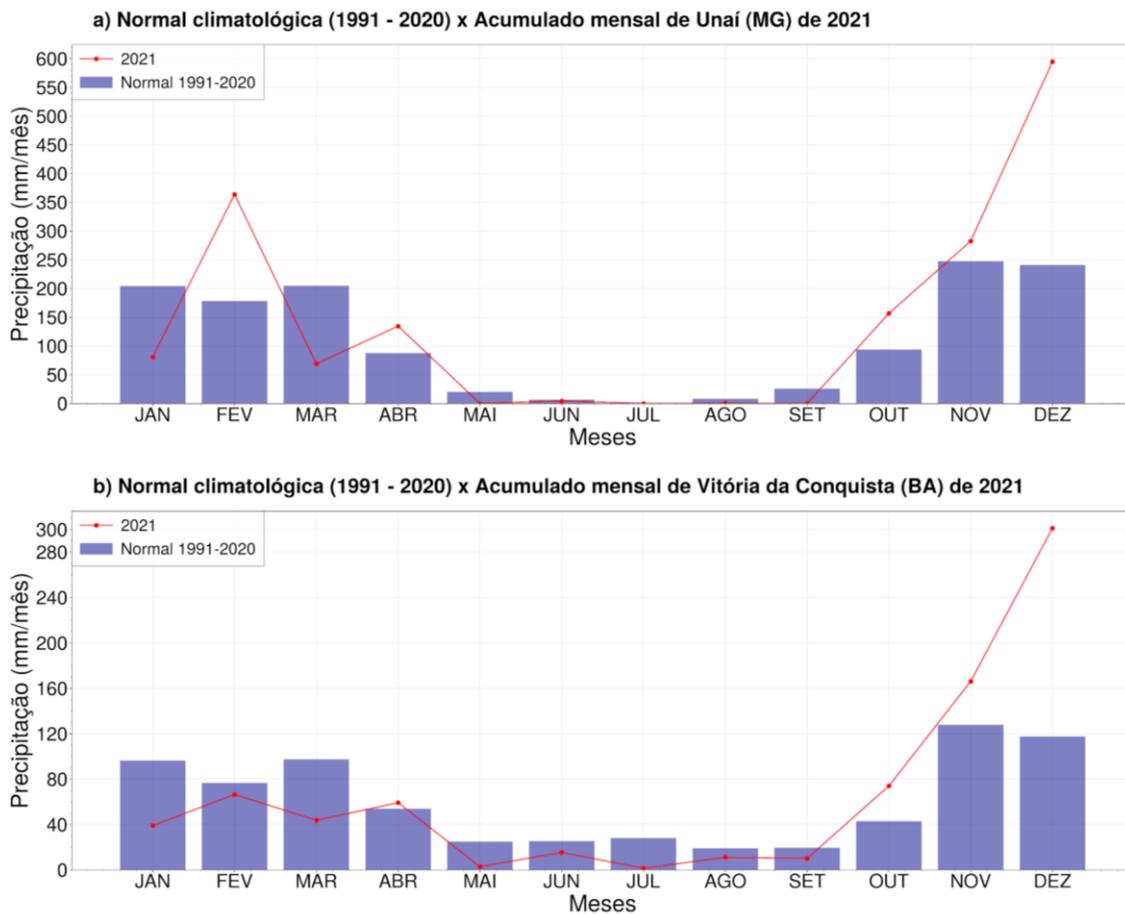
Observa-se uma similaridade entre a normal climatológica do INMET (Figura 23) e a estimativa do CHIRPS (Figura 22), indicando que o ano de 2021 superou a média histórica. Em alguns municípios, como os apresentados nas Figuras 23a-b e Vitória da Conquista-BA (Figura 22f), as estações seca e chuvosa são claramente definidas. Por outro lado, nos municípios apresentados nas Figuras 23c-d, a média da precipitação varia pouco de um mês para outro. Salvador-BA destaca-se pelos meses mais chuvosos, que ocorrem em abril, maio e junho, enquanto Unaí-MG concentra os maiores acumulados de precipitação durante o verão. Essas diferenças são atribuídas à localização latitudinal e características geográficas. Por exemplo, Salvador, cidade litorânea, é influenciada pelos distúrbios ondulatórios de leste, provocando chuvas intensas durante o outono e inverno (Meneghetti; Ferreira, 2009).

Figura 22 - Precipitação do CHIRPS, representando a média mensal de 1991-2020 (barras) e precipitação mensal para 2021 (linhas).



Na Figura 23 apresenta a normal climatológica (1991-2020) (barras) e o acumulado mensal de 2021 (linha) para o município de Unai–MG (Figura 23a) e Vitória da Conquista (Figura 23b). Com relação à Vitória da Conquista, nota-se que a partir de outubro, o acumulado mensal foi superior à normal climatológica. Contudo, foi no mês de dezembro que os valores extrapolaram, chegando por volta dos 300 mm/mês. Já no caso de Unai, houve mais meses em que o acumulado mensal de 2021 foi superior à normal climatológica, com destaque para fevereiro com mais de 350 mm/mês e para dezembro com quase 600 mm/mês, evidenciando como o mês de dezembro foi de chuvas intensas. Dessa maneira, este gráfico com base em dados registrados reforçam a comparação feita anteriormente entre dados registrados e estimativas, uma vez que indicam o mesmo cenário.

Figura 23 - Normal climatológica - INMET (1991-2020, barras) e acumulado mensal de 2021 (linha vermelha) da precipitação para: a) Unaí (MG) e b) Vitória da Conquista (BA).



No gráfico abaixo (Figura 24), são apresentados os acumulados diários para o mês de dezembro de 2021 dos pluviômetros em municípios nos quais ocorreram desastres naturais, a média de precipitação de dezembro de 1991 a 2020 e os percentis de 90, 95 e 99%, com base dados do CHIRPS, referente ao mês de dezembro de toda série histórica. Observa-se que, desde o início do mês, os municípios já registraram acumulados elevados de precipitação. Destaque especial para Jaguaquara (95,6 e 82 mm/dia) (Figura 24g, h), Porto Seguro (123,7 mm/dia) (Figura 24h) e Ilhéus (149,2 mm/dia) (Figura 24e), todos localizados na Bahia. A precipitação registrada no início do mês, conforme observado na Figura 24, foi responsável pelo solo úmido mostrado na Figura 19. Além disso, esses dados evidenciam que dezembro foi um mês chuvoso em ambos os estados, mas é nos dias 23, 24 e 25 que a chuva se concentra nos municípios, resultado que está conforme o registro de ocorrências de desastres no banco de dados do CEMADEN.

Quando comparada a chuva do mês de dezembro de 2021 com a média de dezembro (1991-2020), nota-se que, em todos os municípios, há pelo menos um pluviômetro em que a

chuva está acima da média, pelo menos em algum dia. Adicionalmente, nota-se para o percentil de 99, pois chuvas acima desse percentil indicam uma precipitação mais intensa do que 99% das precipitações que ocorrem naquela localidade. Observa-se que o único município em que a chuva não ultrapassou este percentil foi Governador Valadares–MG; em todos os outros, tanto a estimativa do CHIRPS quanto os dados dos pluviômetros foram superiores a esse percentil pelo menos em algum dia do mês.

Interessantemente nota-se que mesmo que o desastre tenha acontecido entre os dias 23 e 26, já no início do mês diversas cidades registram chuva acima do percentil de 99%, como Porto Seguro, Ilhéus, Itabuna e Jaguaquara na Bahia. Já para o percentil de 95%, identifica-se um aumento no número de dias em que a precipitação esteve acima desse percentil, quando comparado com o de 99%. Este cenário indica que a chuva antecedente também foi intensa e influenciou nas ocorrências registradas pelo CEMADEN entre os dias 23 e 26. Portanto, o mês de dezembro, especialmente durante os dias do evento, registrou níveis de precipitação acima dos percentis históricos em várias localidades.

Figura 24 - Acumulado diário do mês de dezembro de 2021 de precipitação para municípios monitorados pelo CEMADEN, para precipitação proveniente do CHIRPS (barra vermelha), pluviômetros (barra azul, amarela, rosa, verde, preta e roxa) do CEMADEN. Além das linhas com a média histórica de dezembro (1991-2020) e os percentis de 90, 95 e 99.



No que diz respeito aos dados de precipitação durante os dias do evento, a Figura 25 apresenta os valores registrados pelos pluviômetros do CEMADEN, a estimativa do conjunto de dados CHIRPS e assim como no gráfico anterior, a média de dezembro (1991-2020) e os percentis de 90, 95 e 99%. Observa-se uma variação entre o que foi estimado e o que foi registrado. Em alguns dias, o CHIRPS superestimou a precipitação, enquanto em outros a subestimou. Para algumas cidades a precipitação estimada ficou próxima do valor registrado,

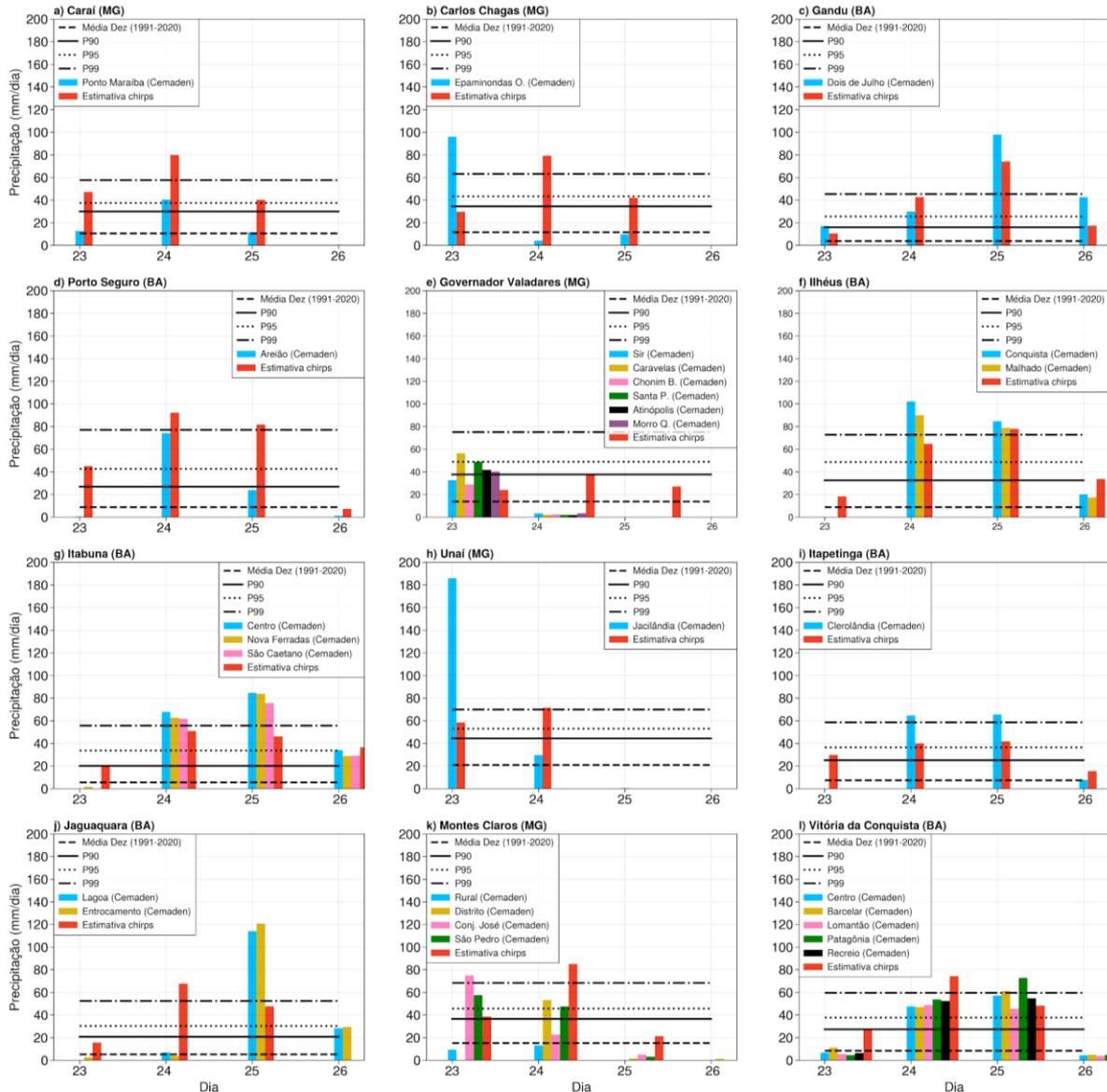
como foi o caso de Ilhéus–BA no dia 25, Itabuna–BA no dia 24, Governador Valadares–MG no dia 23 e Vitória da Conquista no dia 25 de dezembro.

Em Unaí–MG, a quantidade acumulada de chuva atingiu mais de 180 mm no dia 23 de dezembro, ultrapassando a média de dezembro (1991-2020) e o percentil de 99%. Em Jaguaquara–BA, o acumulado superou os 100 mm no dia 25 de dezembro e também ficou acima da média e do percentil de 99%. Ambos os municípios, a estimativa do CHIRPS subestimou a precipitação no respectivo dia.

Além disso, observa-se que apesar de ter registro de ocorrências em todos os municípios, o volume de precipitação varia. Isso demonstra que mesmo em um evento de ZCAS, como no caso deste estudo, no qual uma de suas características é abranger uma grande área, a intensidade da precipitação varia de uma cidade para outra, evidenciando que as características locais também influenciam no volume da precipitação. Outro fator que influencia no número de ocorrências, são as características geofísicas e geomorfológicas do local (Ceped/Ufsc, 2013). Além de fatores sociais como a ocupação em áreas de risco (Kobiyama *et al.*, 2006). Observa-se que o volume mais expressivo de chuva ocorreu em dias distintos, variando conforme o município. De forma geral, a precipitação concentrou-se inicialmente nos municípios de Minas Gerais e posteriormente na Bahia, sugerindo um deslocamento do sistema atuante, comprovado pela análise sinótica.

Como pode ser observado, em boa parte dos municípios, a precipitação foi superior ao percentil de 90% no dia 24 de dezembro, apenas Carlos Chagas–MG, Governador Valadares–MG e Jaguaquara–BA que a precipitação registrada foi abaixo desse limiar. Além disso, esses resultados reforçam que não se tratou de uma chuva localizada, mas sim que afetou toda a região, porém sua distribuição espacial não foi homogênea.

Figura 25 - Acumulado diário de precipitação dos dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 para municípios monitorados pelo CEMADEN, para precipitação proveniente do CHIRPS (barra vermelha), pluviômetros (barra azul, amarela, rosa, verde, preta e roxa). Além das linhas com a média histórica de dezembro (1991-2020) e os percentis de 90, 95 e 99.



É relevante realizar o cálculo dos percentis para avaliar a intensidade das chuvas em determinado município. Além disso, a análise do acumulado móvel de 3 dias torna-se crucial para compreender como as chuvas anteriores ao primeiro dia do evento impactaram as ocorrências. A Tabela 2 apresenta os valores de cada percentil para todos os municípios, juntamente com a quantidade de chuva registrada em cada dia do evento. Destaca-se que em 17 casos a precipitação excedeu o percentil de 99%, indicando que essa chuva se enquadra no 1% mais intenso que o município já vivenciou.

No caso do acumulado móvel de 3 dias, conforme mostrado na Tabela 2, diversos municípios excederam o percentil de 99% da série histórica, evidenciando uma variação mais ampla nesse indicador. Observa-se que nos dias 24, 25 e 26 o percentil de 99% foi ultrapassado no município de Jaguaquara. É crucial analisar o evento na totalidade, em vez de considerar os dias isoladamente. Os dados indicam que tanto a precipitação em um único dia quanto a chuva acumulada ao longo dos dias foram intensas.

Outro aspecto relevante a ser enfatizado é que a seca e a estiagem são fenômenos mais frequentes nessa região, conforme indicado por Martins *et al.* (2018). Dessa forma, o limiar para que o acumulado de precipitação seja considerado intenso, varia de uma cidade para outra. A precipitação acumulada de três dias, totalizando 46,3 mm, em Gandu–BA, situa-se entre os 10% de chuvas mais intensas registradas no município. Por outro lado, em Ilhéus–BA, a precipitação deve superar os 85,5 mm para ser classificada entre as 10% mais intensas. Isso destaca a importância de compreender o histórico e as características específicas da região para avaliar se uma chuva pode ser considerada intensa ou não.

Tabela 2 - Percentis (90, 95, 99%) e a precipitação registrada de cada município com base no acumulado móvel de 3 dias, com base nos dados CHIRPS. Entre parênteses está indicado qual percentil foi ultrapassado.

Percentil acumulado móvel (mm/dia)					Precipitação nos dias do evento (mm/dia)			
	Município	P90	P95	P99	Dia 23	Dia 24	Dia 25	Dia 26
1	Caraí	48,4	70,8	114,4	69,3 (>P90)	139,1 (>P99)	167,3 (>P99)	120,2 (>P99)
2	Carlos Chagas	61,4	82,5	130,8	58,0	127,4 (>P95)	151 (>P99)	121,3 (>P95)
3	Gandu	37,2	60,2	122,8	46,3 (P90)	68,2 (>P95)	127,6 (>P99)	134,3 (>P99)
4	Governador Valadares	59,2	82,8	133,9	31,0	60,5 (>P90)	87,5 (>P95)	63,7 (>P90)
5	Ilhéus	82,7	123,3	205,1	66,6	123,4 (>P90)	160,8 (>P95)	175,9 (>P95)
6	Itabuna	53,3	84,9	148,5	59,2 (>P90)	97,5 (>P95)	118,2 (>P95)	134 (>P95)
7	Itacaré	56,1	86,7	157,9	45,8	102,8 (>P95)	137,7 (>P95)	164,9 (>P95)
8	Itapetinga	48,2	72,8	118,8	57,3 (>P90)	88,1 (>P95)	111,4 (>P95)	97,1 (>P95)
9	Jaguaquara	40,2	61,7	108,8	60,2 (>P90)	114,5 (>P99)	130,9 (>P99)	115,2 (>P99)

10	Jampruca	40,5	58,0	97,7	25,8	49,2 (>P90)	65,5 (>P95)	39,7
11	Matuípe	35,3	58,7	111,8	35,5 (>P90)	59,3 (>P95)	85,9 (>P95)	109,2 (>P95)
12	Medeiros Neto	49,5	71,5	117,1	51,1 (>P90)	153,3 (>P99)	180,4 (>P99)	142 (>P99)
13	Montes Claros	63,7	85,7	131,8	91,9 (>P95)	158,5 (>P99)	144,9 (>P99)	106,4 (>P95)
14	Porto Seguro	76,8	112,8	185,9	95,9 (>P90)	154,8 (>P95)	218,6 (>P99)	180,7 (>P95)
15	Salvador	60,0	90,8	180,7	66,6 (>P90)	95,2 (>P95)	100,7 (>P95)	115,9 (>P95)
16	Unai	85,2	105,8	147,8	89,2 (>P90)	146,2 (>P95)	129,8 (>P95)	71,5
17	Vitória da Conquista	48,0	72,3	117,3	61,7 (>P90)	123,8 (>P99)	149 (>P99)	148,9 (>P99)

As últimas análises mostraram que as precipitações registradas nos pluviômetros do CEMADEN foram intensas, superando a média histórica e atingindo o percentil de 99% em alguns casos, o que desencadeou inundações, alagamentos e movimentos de massa. Além disso, desde o início do mês, a região registrou chuvas que contribuiriam para o aumento do nível dos rios e do solo úmido. No entanto, para determinar se o evento foi extremo ou não, é relevante analisar o tempo de retorno. Através dessa análise, é possível determinar a recorrência daquele evento de precipitação para aquele município.

Na Tabela 3 é apresentado os dados do CHIRPS para cada dia do evento e o resultado do cálculo do tempo de retorno para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, para cada município. Observa-se que conforme as estimativas, apenas Medeiros Neto–BA e Montes Claros–MG, a precipitação foi superior a um determinado tempo de retorno. Em ambos os municípios, a precipitação ultrapassou o TR de 2 anos, indicando que a quantidade de chuva registrada foi superior à chuva esperada para um intervalo de dois anos, denotando assim uma frequência elevada. Isso evidencia que mesmo para eventos recorrentes, a cidade não está adequadamente preparada. Além disso, mostra que não foram apenas as chuvas entre os dias 23 e 26 de dezembro que foram responsáveis pelas ocorrências, mas sim a sucessão de episódios consecutivos de ZCAS na região, provocando chuva por vários dias, aumentando os níveis dos rios e deixando o solo úmido, como discutido anteriormente.

Tabela 3 - Precipitação (mm/dia) estimada pelo CHIRPS para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Evento (CHIRPS) x Tempo de Retorno										
Município	Evento (mm/dia)				Tempo de Retorno (mm/dia)					
	23/12	24/12	25/12	26/12	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
Carai (MG)	47,1	79,9	40,3	0,0	81,9	97,0	108,6	120,5	136,4	148,7
Carlos Chagas (MG)	29,7	79,2	42,1	0,0	90,4	107,3	121,5	136,9	159,6	178,5
Gandu (BA)	10,7	42,7	74,2	17,4	114,3	127,5	134,7	140,2	145,4	148,2
Governador Valadares (MG)	23,8	36,8	27,0	0,0	88,9	101,5	110,4	119,0	129,7	137,4
Ilhéus (BA)	18,3	64,7	77,9	33,4	139,1	144,7	147,1	148,6	149,8	150,2
Itabuna (BA)	20,9	51,0	46,2	36,7	125,4	137,9	145,0	150,5	156,0	159,2
Itacaré (BA)	23,5	57,0	57,3	50,7	125,2	135,7	141,3	145,4	149,3	151,4
Itapetinga (BA)	29,8	39,9	41,8	15,5	95,8	108,0	115,6	122,0	129,1	133,5
Jaguaquara (BA)	15,6	67,7	47,6	0,0	98,0	116,4	129,5	142,1	157,9	169,2
Jampruca (MG)	25,8	23,4	16,3	0,0	71,5	80,6	86,5	91,7	97,6	101,4
Matuípe (BA)	0,0	32,7	53,2	23,4	105,0	118,8	127,0	133,7	140,6	144,7
Medeiros Neto (BA)	38,3	102,2	39,8	0,0	92,6	107,2	117,8	128,0	140,8	150,0
Montes Claros (MG)	38,6	85,1	21,3	0,0	83,1	94,3	102,3	110,0	119,6	126,5
Porto Seguro (BA)	45,0	92,0	81,7	7,0	135,4	142,6	145,7	147,7	149,3	150,0
Salvador (BA)	9,2	43,0	48,6	24,4	132,9	142,0	146,0	148,6	150,7	151,6
Unaí (MG)	58,3	71,5	0,0	0,0	85,0	95,9	104,1	112,4	123,3	131,5
Vitória da Conquista (BA)	26,5	74,2	48,3	26,4	84,6	99,3	110,4	121,5	136,3	147,4

Na Tabela 4, estão registradas as quantidades de precipitação medidas pelos pluviômetros do CEMADEN nos dias do evento e o resultado do cálculo do tempo de retorno para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, para cada município. Vale lembrar que nem todos os municípios têm pluviômetro. Nesses casos, há um traço (-) nas colunas referentes aos dias

do evento. Nota-se uma divergência entre os dados da Tabela 3 e 4, isso ocorre porque, segundo os dados registrados, os municípios em que a estimativa indicou uma precipitação superior ao tempo de retorno de 2 anos não se concretizou. Por outro lado, em Carlos Chagas–MG, a estimativa foi de 29,7 mm no dia 23/12 (Tabela 3), enquanto o pluviômetro registrou 96 mm, superando a chuva esperada a cada 2 anos (Tabela 4). Situação semelhante ocorreu com Jaguaquara-BA, no dia 25/12, onde o CHIRPS estimou 47,6 mm de chuva (Tabela 3), contudo foram registrados 120,6 mm (Tabela 4), superando a precipitação esperada a cada 5 anos.

O caso de Unaí–MG chama atenção, pois a estimativa do CHIRPS indicou um acumulado de 58,3 mm (Tabela 3), porém foi registrado pelo pluviômetro 186 mm no dia 23 de dezembro, este valor é superior ao tempo de retorno de 100 anos (133,2 mm/dia), indicando que a chuva do dia 23 de dezembro foi extrema para o município, ou seja, o evento tem uma baixa recorrência e a cidade não estava preparada para este tipo de evento (Tabela 4).

Tabela 4 - Precipitação (mm/dia) registrada pelo CEMADEN para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado com base nos dados do CHIRPS para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Evento (CEMADEN) x Tempo de Retorno										
Município	Evento (mm/dia)				Tempo de Retorno (mm/dia)					
	23/12	24/12	25/12	26/12	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
Caraí (MG)	12,8	40,4	11,6	0,4	81,9	97,0	108,6	120,5	136,4	148,7
Carlos Chagas (MG)	96	4,2	9,8	0,2	90,4	107,3	121,5	136,9	159,6	178,5
Gandu (BA)	17,08	29,99	98,05	42,61	114,3	127,5	134,7	140,2	145,4	148,2
Governador Valadares (MG)	56,2	2	0	0	88,9	101,5	110,4	119,0	129,7	137,4
Ilhéus (BA)	0	102,08	84,75	20,12	139,1	144,7	147,1	148,6	149,8	150,2
Itabuna (BA)	0	67,8	84,6	34,02	125,4	137,9	145,0	150,5	156,0	159,2
Itacaré (BA)	-	-	-	-	125,2	135,7	141,3	145,4	149,3	151,4
Itapetinga (BA)	0	64,69	65,41	7,78	95,8	108,0	115,6	122,0	129,1	133,5
Jaguaquara (BA)	2,6	3,8	120,6	29,4	98,0	116,4	129,5	142,1	157,9	169,2
Jampruca (MG)	-	-	-	-	71,5	80,6	86,5	91,7	97,6	101,4
Matuípe (BA)	-	-	-	-	105,0	118,8	127,0	133,7	140,6	144,7

Medeiros Neto (BA)	-	-	-	-	92,6	107,2	117,8	128,0	140,8	150,0
Montes Claros (MG)	57,6	47,6	3,2	0	83,1	94,3	102,3	110,0	119,6	126,5
Porto Seguro (BA)	0,4	74,14	23,82	1,18	135,4	142,6	145,7	147,7	149,3	150,0
Salvador (BA)	55,4	51,6	79,8	0,8	132,9	142,0	146,0	148,6	150,7	151,6
Unaí (MG)	186	29,6	0,4	0	85,0	95,9	104,1	112,4	123,3	131,5
Vitória da Conquista (BA)	4,56	53,7	72,69	4,79	84,6	99,3	110,4	121,5	136,3	147,4

Além da análise do tempo de retorno com base no acumulado diário, foi calculado também com base no acumulado móvel de 3 dias (Tabelas 4 e 5). Por exemplo, o acumulado móvel de três dias é calculado de forma que a precipitação do dia 23 de dezembro, é a soma do dia 21, 22 e 23 de dezembro e assim por diante para os demais dias dos eventos. Nota-se que para esse cenário, a estimativa do dia 25 de dezembro para o município de Caraí–MG e Medeiros Neto–BA superou o tempo de retorno de 2 anos. Indicando que a cada 2 anos é esperado que a chuva acumulada de 3 dias supere o valor de 165,1 mm e 180,4, respectivamente.

Tabela 5 - Acumulado móvel de 3 dias da precipitação (mm/dia) estimada pelo CHIRPS para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Acumulado móvel de 3 dias - Evento (CHIRPS) x Tempo de Retorno										
Município	Evento (mm/dia)				Tempo de Retorno (mm/dia)					
	23/12	24/12	25/12	26/12	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
Caraí (MG)	69,3	139,1	167,3	120,2	166,6	184,0	195,1	204,6	215,3	222,1
Carlos Chagas (MG)	58,0	127,4	151,0	121,3	183,7	202,8	215,5	226,8	239,9	248,6
Gandu (BA)	46,3	68,2	127,6	134,3	196,9	219,3	232,9	244,1	255,9	263,1
Governador Valadares (MG)	31,0	60,5	87,5	63,7	185,3	206,6	221,9	236,3	254,4	267,3
Ilhéus (BA)	66,6	123,4	160,8	175,9	241,8	245,8	247,3	248,1	248,6	248,8
Itabuna (BA)	59,2	97,5	118,2	134,0	209,5	224,8	233,2	239,5	245,6	249,0
Itacaré (BA)	45,8	102,8	137,7	164,9	222,1	231,8	235,9	238,4	240,2	241,0
Itapetinga (BA)	57,3	88,1	111,4	97,1	163,1	181,5	194,6	207,1	222,7	233,9
Jaguaquara (BA)	60,2	114,5	130,9	115,2	172,9	199,0	217,4	234,8	256,3	271,5

Jampruca (MG)	25,8	49,2	65,5	39,7	142,6	162,0	176,1	189,9	207,4	220,3
Matuípe (BA)	35,5	59,3	85,9	109,2	179,6	197,3	207,2	214,8	222,2	226,3
Medeiros Neto (BA)	51,1	153,3	180,4	142,0	169,8	192,1	208,2	223,6	243,2	257,3
Montes Claros (MG)	91,9	158,5	144,9	106,4	186,1	204,7	216,8	227,3	239,1	246,8
Porto Seguro (BA)	95,9	154,8	218,6	180,7	235,6	242,7	245,7	247,4	248,7	249,2
Salvador (BA)	66,6	95,2	100,7	115,9	235,3	242,9	246,0	247,8	249,1	249,6
Unaí (MG)	89,2	146,2	129,8	71,5	190,5	206,9	218,2	228,5	240,9	249,3
Vitória da Conquista (BA)	61,7	123,8	149,0	148,9	167,7	192,8	212,6	233,3	261,8	284,3

Na Tabela 6 é apresentado o tempo de retorno com base no acumulado móvel de 3 dias e os dados registrados pelos pluviômetros do CEMADEN após o cálculo do acumulado de 3 dias. Assim como na Tabela 4, é importante lembrar que nem todos os municípios possuem pluviômetro, nesses casos há um traço (-) nas colunas referentes aos dias do evento. Nota-se que novamente apenas em Unaí–MG, o valor registrado foi superior ao tempo de retorno. Dessa vez, foi no dia 24 de dezembro que a precipitação acumulada de 3 dias (215,8 mm) foi superior ao que é esperado a cada 5 anos (206,9 mm) no município.

Apesar dos elevados acumulados de precipitação, como o acumulado de 3 dias para Ilhéus–BA (206,9 mm) e Itabuna–BA (186,4 mm) no dia 26 de dezembro, as últimas análises indicam que as chuvas nos municípios estão dentro do que é esperado em menos de 2 anos na região, salvo o município de Unaí–MG.

Como observado, as chuvas estão dentro da faixa considerada esperada para a região. No entanto, é importante destacar que essas precipitações foram particularmente intensas, conforme evidenciado pelos percentis e pela média histórica no período de 1991 a 2020. Além disso, é relevante notar que essas chuvas encontraram solos previamente úmidos e rios com níveis elevados, devido às chuvas ocorridas desde o início do mês. Contudo, mesmo que a chuva tenha sido intensa, devido a sua recorrência, os municípios deveriam estar melhor preparados para receber esse quantitativo de precipitação, evidenciando que assim como em outras cidades brasileiras, falta planejamento urbano e remoção de pessoas em áreas de risco, medidas que cabem aos governos e que podem prevenir a população de maiores danos tanto materiais quanto aos danos relacionados à saúde física e psicológica. Além disso, um dos principais fatores relevantes para as ocorrências registradas

foram os acumulados de precipitação anteriores ao evento chave, provocados pela atuação de outros dos eventos de ZCAS.

Uma outra análise que fica clara a partir da comparação entre os tempos de retorno calculados e os percentis é que em muitas vezes os TR são superiores aos percentis, o que é estatisticamente aceitável, especialmente em análises de risco e planejamento baseados na teoria de valores extremos. Isso significa que, mesmo que eventos acima do percentil 99 sejam raros dentro da série histórica observada, a modelagem estatística sugere que, em média, a cada 2 anos, pode-se esperar um evento de magnitude ainda maior.

Tabela 6 - Acumulado móvel de 3 dias da precipitação (mm/dia) registrada pelo CEMADEN para cada município para os dias 23, 24, 25 e 26 de dezembro de 2021 e o tempo de retorno calculado com base nos dados do CHIRPS para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Acumulado móvel de 3 dias - Evento (CEMADEN) x Tempo de Retorno										
Município	Evento (mm/dia)				Tempo de Retorno (mm/dia)					
	23/12	24/12	25/12	26/12	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
Carai (MG)	42,4	56,8	64,8	52,4	166,6	184,0	195,1	204,6	215,3	222,1
Carlos Chagas (MG)	140,2	132,4	110	14,2	183,7	202,8	215,5	226,8	239,9	248,6
Gandu (BA)	46	50,8	145,1	170,6	196,9	219,3	232,9	244,1	255,9	263,1
Governador Valadares (MG)	60,2	59,4	58,2	2	185,3	206,6	221,9	236,3	254,4	267,3
Ilhéus (BA)	33,1	126,5	186,8	206,9	241,8	245,8	247,3	248,1	248,6	248,8
Itabuna (BA)	11,6	75,9	152,4	186,4	209,5	224,8	233,2	239,5	245,6	249,0
Itacaré (BA)	-	-	-	-	222,1	231,8	235,9	238,4	240,2	241,0
Itapetinga (BA)	36,1	12,1	67,1	130,1	163,1	181,5	194,6	207,1	222,7	233,9
Jaguaquara (BA)	81,8	23,8	18,6	127	172,9	199,0	217,4	234,8	256,3	271,5
Jampruca (MG)	-	-	-	-	142,6	162,0	176,1	189,9	207,4	220,3
Matuípe (BA)	-	-	-	-	179,6	197,3	207,2	214,8	222,2	226,3
Medeiros Neto (BA)	-	-	-	-	169,8	192,1	208,2	223,6	243,2	257,3
Montes Claros (MG)	21	9,6	57,6	47,6	186,1	204,7	216,8	227,3	239,1	246,8
Porto Seguro (BA)	31,2	16	87,7	98,4	235,6	242,7	245,7	247,4	248,7	249,2

Salvador (BA)	78,6	123,2	186,8	132,2	235,3	242,9	246,0	247,8	249,1	249,6
Unaí (MG)	191	215,8	216	30	190,5	206,9	218,2	228,5	240,9	249,3
Vitória da Conquista (BA)	23,9	12,8	65	130,9	167,7	192,8	212,6	233,3	261,8	284,3

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou e caracterizou o histórico de ocorrências de desastres naturais nos estados de Minas Gerais e na Bahia entre 2003 e 2022, além de analisar em detalhes as características meteorológicas que deflagram os desastres naturais que ocorreram entre os dias 23 e 26 de dezembro de 2021. Com relação ao histórico, o principal desastre registrado tanto na Bahia quanto em Minas Gerais foi a estiagem, com 1944 e 1405 ocorrências, respectivamente, no período de 2003 a 2016, com base no banco de dados do S2iD. Isso mostra como estes estados estão propensos a sofrer com a falta de chuva no decorrer dos anos.

Quanto ao evento principal deste estudo (23/12/2021 a 26/12/2021), o fenômeno desencadeador da precipitação, e, por conseguinte das ocorrências associadas, foi a persistência da Zona de Convergência do Atlântico Sul sobre a região, conforme evidenciado por imagens de satélite e pela análise sinótica. Nesse período, foram registrados volumes de chuva superiores a 70 mm/dia na maioria da área de estudo, ultrapassando a média histórica para o mês de dezembro. Em alguns casos, os índices chegaram a superar o percentil de 99%, como observado em Itabuna–BA, Ilhéus–BA e em Unaí–MG. Além disso, o cálculo dos percentis se mostrou importante para compreender que cada município, mesmo estando geograficamente próximos, possuem características distintas que fazem com que os limiares para uma chuva ser considerada intensa, mude de um município para outro.

Entretanto, é importante salientar que as precipitações anteriores ao evento também desempenharam um papel significativo nas ocorrências. Isso ocorreu porque os registros dos pluviômetros evidenciam acumulados expressivos logo no início do mês, ultrapassando, em alguns municípios, até mesmo a média histórica de dezembro. Adicionalmente, os dados relativos à umidade do solo indicam que as chuvas iniciais deixaram o solo encharcado, tornando-o mais propenso a deslizamentos de terra quando ocorreram as chuvas associadas ao último evento de ZCAS.

Notou-se um aumento significativo na precipitação em vários municípios durante o mês de dezembro, ultrapassando a média esperada para este período. Ao analisar o histórico do acumulado mensal, identificaram-se outros picos de precipitação relacionados à influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul e possivelmente a outras teleconexões, como a Oscilação de Madden-Julian. Esses eventos, ligados a sistemas sinóticos de grande escala, como frentes frias e a ZCAS, podem ter contribuído para os elevados acumulados de precipitação em diferentes anos.

Em relação ao tempo de retorno, as análises mostraram que a precipitação registrada durante os dias 23 e 26 de dezembro de 2021, estavam abaixo do TR de 2 anos, indicando que a precipitação registrada é de certa forma recorrente nos municípios. Apenas em Unai-MG que o acumulado em 24h no dia 23 de dezembro ultrapassou a chuva esperada a cada 100 anos e o acumulado de 3 dias, foi superior à chuva que é esperada a cada 2 anos no dia 25 de dezembro, indicando que neste município a chuva foi extrema.

A partir disso, pode-se inferir, como observado que desde o início de dezembro de 2021 a região registrou grandes volumes de precipitação, que deixaram o solo úmido e após as precipitações ocorridas entre 23 e 26 que também foram intensas, pois como dito anteriormente, em diversos municípios superou o percentil de 95% e 99% além da média histórica, deflagraram as diversas ocorrências que causaram prejuízos para os dois estados. Contudo, exceto o município de Unai-MG, em todos os outros a precipitação registrada estava dentro do que é esperado em menos de dois anos, o que torna uma precipitação recorrente. Dessa maneira, entende-se que medidas de planejamento já poderiam ser adotadas esperando volumes de chuvas desse porte nessa época do ano, no qual são comuns episódios de ZCAS.

Essa análise, mostra como o desastre está além da meteorologia e envolve diversos fatores sociais e governamentais. Pois é de responsabilidade dos setores governamentais retirar a população que vive em áreas de risco e realizar o planejamento urbano, já pensando em situações de precipitação extrema e episódios de precipitações subsequentes que podem atingir um determinado município. Para que isso ocorra, é necessário atualizar o Plano Municipal de Redução de Riscos, com o intuito de identificar as áreas de risco e os habitantes em situação de vulnerabilidade, e implantar medidas efetivas de prevenção e mitigação dos danos. A hidrossemeadura, uma iniciativa adotada pela prefeitura de São Sebastião após o desastre em fevereiro de 2023, pode ser replicada em outros municípios para conter deslizamentos de terra. Essa técnica consiste no plantio com mulch (liga) de fibra

de madeira, biorretentores e biomanta, facilitando o enraizamento dos vegetais e sua fixação ao terreno.

Além disso, torna-se necessário atualizar as medidas de resposta, como a instalação de sirenes em áreas propensas a desastres, sinalização de rotas de fuga, identificação de pontos de encontro e estabelecimento de abrigos.

O presente trabalho evidencia quão importante é conhecer as características locais e o histórico de precipitação, para definir qual o limiar de uma chuva intensa e se ela é realmente extrema ou se o município que não está preparado para as recorrentes chuvas de verão. Indicando que neste caso, faltou planejamento urbano nos municípios atingidos. Reforçando a responsabilidade do governo com relação aos impactos negativos das chuvas intensas.

Nesse contexto, este estudo pode servir como base para trabalhos futuros nesta temática e para o planejamento de políticas públicas que visam a mitigação dos efeitos adversos de inundações, movimentos de massa, enxurradas e demais ocorrências. Para trabalhos futuros sugere-se que seja estudado com maior detalhamento as áreas de risco, o planejamento urbano e analisado o que o governo tem feito para diminuir os impactos dos desastres, além de uma avaliação conjunta dos impactos socioeconômicos provocados por esses desastres naturais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALST, M. K. V. The impacts of climate change on the risk of natural disasters. **Disasters**, v.30, n. 1, p. 5–18, 2006. DOI:10.1111/j.1467-9523.2006.00303.x. Acesso em: 01 abr. 2023.

ALCÂNTARA, E.; MARENGO, J. A.; MANTOVANI, J.; LONDE, L. R.; SAN, R. L. Y.; PARK, E.; LIN, Y. N.; WANG, J.; MENDES, T.; CUNHA, A. P.; PAMPUCH, L.; SELUCHI, M.; SIMÕES, S.; CUARTAS, L. A.; GONCALVES, D.; MASSI, K.; ALVALÁ, R.; MORAES, O.; FILHO, C. S.; MENDES, R.; NOBRE, C. Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 23, p. 1157-1175, 2023. DOI:10.5194/nhess-2022-163. Acesso em: 28 mar. 2023.

ALCÂNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazard, vulnerability and prevention of natural disasters developing countries. **Geomorphology**, v. 47, p.107-124, 2002. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/222577933_Geomorphology_Natural_Hazards_Vulnerability_and_Prevention_of_Natural_Disasters_in_Developing_Countries. Acesso em: 05 abr. 2023.

ALVALÁ, R. S. C.; BARBIERI, A. Desastres Naturais. In: NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. (Orgs). **Mudanças Climáticas em Rede: Um Olhar Interdisciplinar**. Bauru: Canal6, 2017. 203-230 p.

AMARAL, R.; GUTJAHR, M. R. **Cadernos de Educação Ambiental: Desastres Naturais**. 8 Ed. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico, 2011. 201 p.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I.; ALVES, L. M. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais**. Relatório 3, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas –SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI, 2007.

AQUINO, J. R.; NASCIMENTO, C. A. A grande seca e as fontes de ocupação e renda das famílias rurais no nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**. v. 51, n. 2, p. 81-97, 2020. Disponível em: <<https://g20mais20.bnb.gov.br/revista/index.php/ren/article/view/1090/831>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

ASSUNÇÃO, V. R. A. **Proposta de metodologia de cálculo para reservatórios de retenção em bacias hidrográficas urbanizadas**. 2012. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CALDERANO FILHO, B.; CARVALHO JÚNIOR, W. CALDERANO, S. B.; GUERRA, A. J. T. Suscetibilidade dos solos à erosão na área de entorno do reservatório da usina hidrelétrica de Tombos (MG). **Revista Geonorte**, v. 10, n. 10, p. 476-481, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1786>. Acesso em: 20 jun. 2023.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**. v. 17, p. 88–108, 2004.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. 2006. Ação de Apoio à Prevenção e Erradicação de Riscos em Assentamentos Precários. In: CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. (orgs.). **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais**. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006, p. 10-17.

CARVALHO, R. G. **Obtenção da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de chuvas intensas para a bacia hidrográfica do Igarapé Murupu, Boa Vista-RR**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2007

CASTRO, A. **Glossário de defesa civil: estudo de riscos e medicina de desastres**. MPO/Departamento de Defesa Civil. Brasília, p. 283. 1998. disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/glossario.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

CEPED-UFSC. Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catarina., 2013. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume brasil. Florianópolis. https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2012/01/AMAZONAS_mioloWEB.pdf. Acesso em: 04 mai. 2023

CNNa, 2022. Chuvas deixam 59 mortos e colocam 125.200 pessoas para fora de suas casas. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/chuvas-deixam-mortos-e-colocam-peopleas-para-fora-de-suas-casas/>>. Acesso em: 10 de jun. de 2022.

CNNb, 2023. Famílias retornam para casa após um mês das chuvas em São Sebastião; até 900 imóveis devem ser construídos. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/familias-retornam-para-casa-apos-um-mes-das-chuvas-em-sao-sebastiao-ate-900-imoveis-devem-ser-construidos/>>. Acesso em: 10 de abr. de 2023.

CNNc., 2022. Desastre provocado pelas fortes chuvas deixa 104 mortos em Petrópolis (RJ). Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/mortes-chuvas-em-petropolis/>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

DALAGNOL, R.; GRAMCIANINOV, C. B. CRESPO, N. M.; LUIZ, R.; CHIQUETTO, J. B.; MARQUES, M. T. A.; NETO, G. D.; ABREU, R. C.; LI, S.; LOTT, F. C.; ANDERSON, L. O.; SPARROW, S. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? **Climate Resilience and Sustainability**. p. 1-15, 2021. DOI:10.1002/cli2.15. Acesso em: 20 mar. 2023.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCLETTE, J.-J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.-N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Royal Meteorological Society**. V. 137, n. 656, p. 553–597, 2011. doi:10.1002/qj.828

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. v. 35, n. 2, p. 43 – 54, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2012_2_43_54. Acesso em: 17 mai. 2023.

ENTEKHAB, D. et al., 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. In: Proceedings of the IEEE, 98(5), 704-716. doi: 10.1109/JPROC.2010.2043918. Acesso em: 18 jun. 2023.

FREITAS, C.; CARVALHO, M.; XIMENES, E.; ARRAES, E.; GOMES, J. Vulnerabilidade Socioambiental, Redução de Riscos de Desastres e Construção da Resiliência -lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1577-1586, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.org/article/csc/2012.v17n6/1577-1586/pt/>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

FREITAS, A. A.; ODA, P. S. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; SILVA, P. N.; MATTOS, E. V.; BASTOS, I. R. P.; NERY, T. D.; METODIEV, D.; SANTOS, A. P. P.; GONÇALVES, W. A. Meteorological conditions and social impacts associated with natural disaster landslides in the Baixada Santista region from March 2nd–3rd, 2020. *Urban Climate*, v. 42, p. 1-22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101110>. Acesso em: 28 abr. 2023.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005. Disponível em: [Microsoft Word - 2_antonio_ferreira.doc \(ufc.br\)](#).

FRUTUOSO, G. K. da C.; GRIGIO, A. M.; DE ALBUQUERQUE NETO, T. C. Mapeamento das áreas de risco de inundação urbana na cidade de Assú-Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 06, p. 2994-3012, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/253775>. Acesso em: 18 abr. 2023.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2014. Sistemas atmosféricos atuantes sobre o Nordeste. Disponível em: [Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre o Nordeste - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos \(funceme.br\)](#). Acesso em: 19 abr. 2024.

FUNK, C.; PETERSON P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J. SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, 2015; DOI:10.1038/sdata.2015.66. Acesso em: 17 mai. 2023.

GIANNINI, A.; CHIANG, J. C. H.; CANA, M. A.; KUSHNIR, Y.; SEAGER, R. The ENSO teleconnection to the tropical Atlantic Ocean: contributions of the remote and local SSTs to rainfall variability in the tropical Americas. *Journal of Climate*. 14, 4530–4544 (2001). DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<4530:TETTTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4530:TETTTT>2.0.CO;2). Acesso em: 07 jan. 2024

GLOBOPLAY, 2023. Tragédia de Lajedinho, na Chapada, completa 4 anos com obras ainda por concluir - 07/12/2017. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/6340440/>. Acesso em: 29 jun. 2023.

G1a, 2022. Bahia tem mais de 26 mil desabrigados, 61,5 mil desalojados e duas pessoas estão desaparecidas por causa da chuva. Disponível em: <https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2022/01/08/bahia-tem-mais-de-26-mil-desabrigados-615-mil-desalojados-e-duas-pessoas-estao-desaparecidas-por-causa-da-chuva.ghtml>. Acesso em: 10 de junho 2022.

G1b, 2022. Seis meses após tragédia em Petrópolis, famílias retornam para áreas de risco e obras de contenção ainda não foram realizadas. <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2022/08/15/seis-meses-apos-tragedia-em-petropolis-familias-retornam-para-areas-de-risco.ghtml>. Acesso em: 30 abr. 2023.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 2,

p. 57-75, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/wvzfPmYwJXtsRBPWjHsrJJP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 jun. 2023.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/an%C3%A1lise-das-chuvas-na-bahia-minas-gerais-e-espir%C3%ADto-santo-em-dezembro-de-2021>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/PROG_primavera_2021_vers%C3%A3ofinal2021.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/fen%C3%B4meno-la-ni%C3%B1a-chega-ao-fim-ap%C3%B3s-tr%C3%AAs-anos-de-dura%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

ISDR - International Strategy for Disaster Reduction. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives. 1 Ed. Geneva: UN/ISDR, 2004.

JOSÉ, R. V. S.; COLTRI, P. P.; GRECO, R.; SOUZA, I. S.; TORRES, G. A. L.; CHARLES, R.; SANTOS, K. A. Avaliação da vulnerabilidade agrícola à seca: Um estudo de caso no semiárido do estado da Bahia. **Caminhos da Geografia**, v. 21, n. 77, p. 96-110, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG217752133>. Acesso em: 10 mai. 2023.

JOSÉ, R. V. S.; COLTRI, P. P.; GRECO, R.; SOUZA, I. S.; SOUZA, A. P. S. Hazard (seca) no semiárido da Bahia: Vulnerabilidades e Riscos climáticos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 04, p. 1978-1993, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/252836/42367>>. Acesso em: 28 abr. 2023.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de Desastres Naturais Conceitos Básicos**. 1 Ed. Curitiba: Organic Trading, 2006. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/07/Livro_Prevencao_de_Desastres_Naturais.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2023.

LUIZ, G. C.; ROMÃO, P. A. Interação solo-atmosfera e processos de inundação e alagamentos na cidade de Goiânia-GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 05, p. 1891-1903, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338868586_Interacao_Solo-Atmosfera_e_Processos_de_Inundacao_e_Alagamento_na_Cidade_de_Goiania-GO. Acesso em: 23 mai. 2023.

MALVESTIO, L. M. **Variabilidade da precipitação pluviométrica da região Sudeste do Brasil no período chuvoso e suas consequências ambientais**. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. 1 Ed. Santa Maria: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Jan. 2008.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. **Caminhos de Geografia**, v.6, n.19, p. 130-149, 2006. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG71915495>. Acesso em: 16 mai. 2023.

MARCHEZINI, V.; IWAMA, A. Y.; ANDRADE, M. R. M.; TRAJBER, R.; ROCHA, I.; OLIVATO, D. Geotecnologias para prevenção de riscos de desastres: Usos e potencialidades dos mapeamentos participativos. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69, p. 107-128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv69n1-44035>. Acesso em: 20 jun. 2023.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 2006. 202p. (**Biodiversidade**, 26).

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 1-19, 2006.

MARENGO, J. A. Cenários de Mudanças Climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência & Ambiente**. v.34, p.100-125, 2007.

MARENGO, J.A., ALCÂNTARA, E., CUNHA, A.P., SELUCHI, M., NOBRE, C.A., DOLIF, G., GONÇALVES, D., ASSIS D.M., CUARTAS, L.A., BENDER, F., RAMOS, A.M., MANTOVANI, J.R., ALVALÁ, R.C., MORAES, O.L. 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 and Climate Extremes**, v. 34, p. 100545, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>. Acesso em: 03 mai. 2023.

MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P. I.; ALVES, L. M.; DINIZ, F.; BETTS, R. A. 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. 1-18, 2021. DOI:10.3389/fclim.2021.610433. Acesso em: 14 jun. 2023.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanálise**, v. 4, n. 1, p. 49-54. 2016. Disponível em: [researchgate.net/publication/311058940_A_seca_de_2012-15_no_semiarido_do_Nordeste_do_Brasil_no_contexto_historico](https://www.researchgate.net/publication/311058940_A_seca_de_2012-15_no_semiarido_do_Nordeste_do_Brasil_no_contexto_historico). Acesso em: 27 abr. 2023.

MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; GONÇALVES, D.; SPERLING, V. B.; RAMOS, A. M.; DOLIF, G.; SAITO, S.; BENDER, F.; LOPES, T. R.; ALVALA, R. C.; MORAES, O. L. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. **Natural Hazards**, n. 166, p. 3617–3644, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Classificação climática de Koppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, edição especial, ano 14, p. 129-156, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>. Acesso em: 28 mar. 2023.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P. Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and Its Climate Impacts in Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 1, p. 100-110, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02758-3>

MENEGHETTI, G. T.; FERREIRA, N. J. Variabilidade sazonal e interanual da precipitação no Nordeste Brasileiro. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. p. 1685-1689, Natal, 2009. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.19.34/doc/1685-1689.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2024.

METEOROLOGIA-UNIFEI, 2024. Disponível em: Ciências Atmosféricas (unifei.edu.br). Acesso em: 10 mar. 2024.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B. Global Solar Radiation Models in Minas Gerais, Southeastern Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2019, p. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9515430>. Acesso em: 19 abr. 2023.

NAGHETTINI, M.; PORTELA, M. M. **Probabilidade e estatística aplicadas à hidrologia**. DECivil, IST, 2011. Disponível em: http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/HRH/2015_2016%20desactivado/Cap%C3%ADtulo%20HE%20Final%20PT.pdf. Acesso em: 09 mai. 2023.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 06 jan. 2024.

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. Clima da Região Sudeste do Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J., da Silva M. G. A. J.; Dias, M. A. F. S. (Orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos. p. 468, 2009.

OBREGON, G.; MARENGO, J. A. **Caracterização do clima do Século XX no Brasil: tendências de chuvas e temperaturas médias e extremas**. Relatório 2, Brasília: Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas –SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Sub-projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI, 2007.10.1007/s00704-015-1605-9.

ODA, P. S. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; PINTO, T. A. C.; SILVA, F. P.; RIONDET-COSTA, D. R. T.; MATTOS, E. V.; SOUZA, D. O.; BARTOLOMEI, F.; REBOITA, M. S.; SANTOS, A. P. P. Disasters in Petrópolis, Brazil: political, urban planning, and geometeorological factors that contributed to the event on February 15, 2022. **Urban Climate**, v. 54, 2024. DOI doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101849. Acesso em: 27 fev. 2024.

OLIVEIRA, G.B., ALCÂNTARA, C.R., SOUZA, E.P., 2016. Caracterização de perfis de vento no ambiente de formação das linhas de instabilidade amazônicas. **Ciência e Natura**. 38(1), 393 – 403. <https://doi.org/10.5902/2179-460X18337>.

PINTO *et al.*, 2023. Artigo submetido na revista Natural Hazards.

PEDRO, D. F. P.; FREITAS, A. C. V.; BELOTTI, F. M. Influência da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na ocorrência de deslizamentos de massa em Belo Horizonte e cidades vizinhas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. 16, p. 635-659, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.70352>. Acesso em: 24 jun. 2023.

PEREIRA, V. C. M.; KEDE, M. L. F. M.; BERTOLINO, A. V. F. A.; DELAZERI, E. M. a As chuvas de verão sob influência do fenômeno El niño, entre 2005 e 2018, e o risco de inundações no município de São Gonçalo - RJ (Brasil). **Territorium**, v.2, p. 27-41, 2021. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-2_3.

PEREIRA, W. B. S. **Aprendendo com desastres naturais: Inundações e resiliência em Vila Velha/ES**. 2017. 145 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

RAPELLI, C. A.; SOUZA, E. B.; QUADRO, M. F. L.; ALVES, J. M. B.; SAKAMOTO, M. S. Influências da oscilação de Madden-Julian sobre o nordeste brasileiro no final de março/1997, 1998. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/10.15.11.44/doc/1998_repelli.pdf. Acesso em: 16 jan. 2024.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n. 11, p. 206-226, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>. Acesso em: 18 mai. 2023.

REBOITA, M. S.; TEODORO, T. A., FERREIRA, G. W.S., SOUZA, C. A. Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 15, n. 1, p. 343-358, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p343-358>. Acesso em: 16 ago. 2023.

REIS, R. V. **Desastres naturais na região sudeste, associados a eventos climáticos extremos**. Orientador: Dr. Jonas Teixeira Nery. 2015. 77 f. TCC (Graduação em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Ourinhos, 2015.

RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; SILVA, C. M. S.; SOUZA, D. O. Spatial distribution of the level of return of extreme precipitation events in Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, p. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6507>. Acesso em: 10 mai. 2023.

RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B.; SOUZA, D. O.; ARAUJO, P. A. A.; SILVA, C. N.; SILVA, C. M. S. Probability of occurrence of extreme precipitation events and natural disasters in the city of Natal, Brazil. **Urban Climate**, v. 35, p. 1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100753>. Acesso em: 10 mai. 2023.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONCALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885-894, 2010. Acesso em: 09 mai. 2023.

RYZHKOV, A. V.; GIANGRANDE, S. E.; SCHUUR, T. J. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D. **Journal of Applied Meteorology**, v.44, p.502-515, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2213.1>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SAITO, S. M. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Vulnerabilidade**. 6 Ed. Santa Maria: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.

SAITO, S. M.; DIAS, M. C. A.; ALVALÁ, R. C. S.; STENNER, C.; FRANCO, C. O.; RIBEIRO, J. V. M.; SOUZA, P. A.; SANTANA, R. A. S. M. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1-25, 2019. <https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46320>. Acesso em: 26 mai. 2023.

SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007.

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. Estimating return periods for daily precipitation extreme events over the Brazilian Amazon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 126, p. 585-595, 2016. DOI 10.1007/s00704-015-1605-9. Acesso em: 10 mai. 2023

SILVA, R. C.; MARENGO, J. A.; LEMES, M. R. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of Sao Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2024. DOI 10.1007/s00704-024-04857-2. Acesso em: 26 fev. 2024.

STRAKA, J. M.; ZRNIĆ, D. S.; RYZHKOV, A. V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. **Journal of Applied Meteorology**, v.39, p.1341-1372, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1341:BHCAQU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1341:BHCAQU>2.0.CO;2). Acesso em: 12 jun. 2023.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do Semiárido - 2021**. Relatório Final, versão preliminar. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. Acesso em: 26 abr 2023.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/William-Sallun-Filho/publication/311102596_Subsidencia_e_Colapso_em_Terrenos_Carsticos/links/583db04008aeda69680706e4/Subsidencia-e-Colapso-em-Terrenos-Carsticos.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2023.

UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais – 1991 a 2012**. 2o Ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013. 127 p.

UNDRR (UN Office for Disaster Risk Reduction) (2019). **Global Assessment Report Disaster Risk Reduction**. Disponível em:

<https://gar.undrr.org/sites/default/files/reports/2019-05/full_gar_report.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VAREJÃO, M. A. S. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, 2006. p. 463.

VIANA, R. M. **A Remoção dos Desastres e os Desastres da Remoção: risco, vulnerabilidade e deslocamento forçado em Belo Horizonte**. 2015. 260 f. Tese (Doutorado em Demografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/FACE-B7BPRQ>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

WDR - World Disasters Report 2020: (2020 ed.). **International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies**. Disponível em: <<https://media.ifrc.org/ifrc/wpcontent/uploads/2018/10/B-WDR-2018-EN-LR.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2023.