



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA E DAS CONDIÇÕES
SINÓTICAS ASSOCIADA A EVENTOS DE GRANIZO
EM MINAS GERAIS (2018-2023)**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Jhonatan Borges de Toledo

Itajubá, MG, Brasil

2025

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA E DAS CONDIÇÕES SINÓTICAS ASSOCIADAS A EVENTOS DE GRANIZO EM MINAS GERAIS (2018-2023)

por

Jhonatan Borges de Toledo

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Vanessa Silveira Barreto Carvalho

Coorientador: Enrique Vieira Mattos

Itajubá, MG, Brasil

2025

Universidade Federal de Itajubá

Instituto de Recursos Naturais

Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA E DAS CONDIÇÕES SINÓTICAS
ASSOCIADAS A EVENTOS DE GRANIZO EM MINAS GERAIS (2018-
2022)**

elaborada por

Jhonatan Borges de Toledo

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente
VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO
Data: 02/12/2025 13:34:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dr^a. (UNIFEI)

(Presidente/Orientador)



Documento assinado digitalmente
ENRIQUE VIEIRA MATTOS
Data: 01/12/2025 11:08:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)

(Coorientador)



Documento assinado digitalmente
JOAO GABRIEL MARTINS RIBEIRO
Data: 02/12/2025 19:49:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

João Gabriel Martins, Msc. (UNIFEI)



Documento assinado digitalmente
FLAVIO AUGUSTO DOS SANTOS
Data: 02/12/2025 09:04:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Flavio Augusto dos Santos, Bel. (UNIFEI)

Itajubá, 28 de novembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à minha mãe, Célia Regina Pinto, e ao meu pai, Agripino Borges de Toledo, por todo amor, carinho e apoio incondicional durante esta jornada. Foram eles que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu duvidava das minhas próprias capacidades. Cada palavra de incentivo, cada gesto de afeto e cada demonstração de confiança foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista é, acima de tudo, reflexo do esforço e da dedicação que vocês depositaram em mim ao longo de toda a minha vida.

Estendo esta gratidão às minhas queridas irmãs, Thays Cristina de Faria Costa e Fabiana Aparecida de Mira Costa, por serem pilares essenciais de força, amor e apoio em todos os momentos.

À minha namorada, Larissa Rodrigues Marinho, dedico um agradecimento especial por sua paciência, carinho e apoio incondicional durante todas as etapas deste trabalho.

Expresso minha profunda gratidão à minha orientadora, Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho, e ao meu coorientador, Dr. Enrique Vieira Mattos, pela orientação cuidadosa, paciência e disponibilidade ao longo de todas as etapas deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais não apenas para o desenvolvimento deste estudo, mas também para a minha formação acadêmica e pessoal. A cada reunião, aprendizado e conselho, pude compreender mais sobre o verdadeiro valor da pesquisa científica e da dedicação ao conhecimento.

Deixo também registrado meu sincero agradecimento a todos os professores do curso de Ciências Atmosféricas, que, com sabedoria, paciência e entusiasmo, transmitiram não apenas o conteúdo técnico necessário para a profissão, mas também valores humanos e éticos que levarei para toda a vida. Foram anos de convivência, aprendizado e inspiração que contribuíram para a construção do profissional e da pessoa que me torno hoje.

Por fim, agradeço com muito carinho a todos os meus familiares e amigos, que, de diferentes formas, me ajudaram nesta caminhada. Deixo um agradecimento especial aos meus amigos Pedro Machado, Natanael Oliveira e Daniel Patrocinio, pela parceria e apoio mútuo durante os anos de curso. A compreensão, o apoio e a paciência de cada um de vocês foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta etapa tão importante. A todos que, de alguma maneira, fizeram parte desta trajetória, deixo o meu mais sincero e eterno agradecimento.

Para meus pais Celia Regina Pinto e
Agripino Borges de Toledo.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”
(Filipenses 4,13)

RESUMO

Monografia de Graduação

Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA E DAS CONDIÇÕES SINÓTICAS ASSOCIADAS A EVENTOS DE GRANIZO EM MINAS GERAIS (2018- 2023).

AUTOR: JHONATAN BORGES DE TOLEDO

ORIENTADOR: VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO

COORIENTADOR: ENRIQUE VIEIRA MATTOS

Local e Data da Defesa: Itajubá, 28 de novembro de 2025.

Este trabalho analisa a ocorrência e as condições atmosféricas associadas aos eventos de granizo em Minas Gerais entre 2018 e 2023. Esses fenômenos são capazes de causar prejuízos agrícolas, danos à infraestrutura urbana, setor viário, além de interrupções nas cadeias logísticas do setor industrial. O objetivo do trabalho foi avaliar a distribuição espacial e temporal das ocorrências de granizo no estado de Minas Gerais e caracterizar o ambiente sinótico de um evento severo registrado em 3 de outubro de 2022. Foram utilizados dados da Plataforma de Registros de Tempo Severo, que reúne observações de granizo, vendaval e tornado em todo o território brasileiro, e dados de reanálise ERA5. As variáveis extraídas da reanálise: geopotencial, componentes zonal e meridional do vento, velocidade vertical, componentes do vento a 10 metros de altura, pressão ao nível médio do mar e energia potencial disponível para convecção, foram utilizadas na confecção dos mapas de jato de altos níveis, cisalhamento vertical do vento e energia potencial disponível para convecção. A metodologia foi dividida em duas etapas principais. Na primeira, realizou-se uma análise climatológica da ocorrência de granizo em Minas Gerais, no período de 2018 a 2023, a partir dos relatos da plataforma de registros de tempo severo. Esses dados foram filtrados espacialmente para os limites do estado e organizados de modo a possibilitar a avaliação da frequência, distribuição espacial e variação temporal dos eventos. Na segunda etapa, desenvolveu-se um estudo de caso da tempestade severa ocorrida em 3 de outubro de 2022, utilizando variáveis sinóticas e termodinâmicas provenientes de reanálise e cartas sinóticas fornecidas pela Marinha do Brasil, visando caracterizar o ambiente atmosférico responsável pelo desenvolvimento do evento. Os resultados revelaram maior concentração de granizo nas regiões sul e sudoeste do estado de Minas Gerais, com 563 registros, influenciada pela topografia acidentada e fatores atmosféricos que potencializam a convecção. A instabilidade termodinâmica é mais alta na estação chuvosa, com pico entre os meses de outubro e janeiro, totalizando 1216 casos. O estudo de caso de 3 de outubro de 2022 ilustrou essa complexidade: a tempestade foi resultado de um alinhamento atmosférico preciso, no qual a interação entre um cavado invertido e o jato de altos níveis gerou

um forte cisalhamento vertical (>15 m/s) e elevada energia potencial disponível para convecção (1767 J/kg), ambos necessários para a formação de granizo. Este trabalho reforça a importância de uma abordagem integrada da geografia local com os mecanismos meteorológicos, para auxiliar ações de Defesa Civil e mitigar os impactos socioeconômicos em um estado altamente vulnerável a eventos convectivos extremos.

Palavras-chave: Eventos extremos. Tempestade severa. Granizo.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização do estado de Minas Gerais e suas mesorregiões.....	5
FIGURA 2 - Mapa de relevo (metros) do estado de Minas Gerais, indicando as serras da Canastra, do Espinhaço e da Mantiqueira.....	6
FIGURA 3 - Distribuição espacial do total de ocorrências de granizo no estado de Minas Gerais no período de 2018 a 2023. No mapa é mostrado a quantidade de granizo registrado em todo período de estudo e os contornos das mesorregiões são representados com linhas contínuas na cor preta.....	10
FIGURA 4 - Distribuição de ocorrências de granizo para cada mesorregião de Minas Gerais no período de 2018 a 2023.....	11
FIGURA 5 - Distribuição espacial do granizo para os anos de (a-f) 2018 a 2023 para o estado de MG. Em cada mapa é mostrado a quantidade de granizo registrado em cada ano e os contornos das mesorregiões são representados com linhas contínuas na cor preta.....	13
FIGURA 6 - Distribuição espacial de granizo para os meses de (a-f) janeiro a dezembro para o estado de MG entre o período de 2018 e 2023. Em cada mapa é mostrado o total de granizo registrado em cada mês considerando todos os anos e os contornos das mesorregiões são representados com linhas contínuas na cor preta.....	15
FIGURA 7 - Ciclo diurno das ocorrências de granizo no estado de Minas Gerais.....	16
FIGURA 8 - Histograma de frequência da duração das tempestades de granizo, separadas em classes de menores que I) 120 min, II) 121-240 min, III) 241-360, IV) 361-480 e V) maiores que 480.....	17
FIGURA 9 - Localidades afetadas pela ocorrência de granizo em 3 de outubro de 2022.....	18
FIGURA 10 - Fotos da ocorrência de granizo no estado de Minas Gerais no dia 03/10/2022: (a) tamanho e forma dos granizos registrados e (b) acumulação de granizo na BR 381 (Rodovia Fernão Dias).....	19
FIGURA 11 - Cartas sinóticas de pressão ao nível do mar da Marinha do Brasil para o dia 03 de outubro de 2022 às (a) 00:00 UTC e (b) 12:00 UTC.....	20
FIGURA 12 - Jatos de altos níveis preenchidos, pressão em linhas e espessura em pontilhado sobre a América do Sul no dia 03 de outubro de 2022 às 18:00 UTC.....	21

FIGURA 13 - Distribuição espacial da CAPE e das áreas com cisalhamento vertical do vento maior ou igual a 15 m/s na região sudeste do Brasil no dia 3 de outubro de 2022.....	22
---	----

LISTA DE SIGLAS

ASAS	- Alta Subtropical do Atlântico Sul
BR	- Rodovia Federal Brasileira
CAPE	- <i>Convective Available Potential Energy</i> (Energia Potencial Convectiva Disponível)
CCM	- Complexo Convectivo de Mesoescala
C3S	- <i>Copernicus Climate Change Service</i> (Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus)
ECMWF	- <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (Centro Europeu de Previsões de Tempo de Médio Prazo) - <i>Fifth Generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Atmospheric Reanalysis</i> (Reanálise do ECMWF de 5ª geração)
ENOS	- <i>El Niño</i> -Oscilação Sul
JBN	- Jatos de Baixos Níveis
MB	- Marinha do Brasil
MG	- Minas Gerais
PRETS	- Plataforma de Registros de Tempo Severo
SCM	- Sistema Convectivo de Mesoescala
UTC	- Coordinated Universal Time (Tempo Universal Coordenado)
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Aw	- Clima tropical de savana com inverno seco
Cwa	- Clima temperado quente com inverno seco e verões quentes
Cwb	- Clima temperado quente com inverno seco e verões não muito quentes
Bsh	- Clima de estepes quente
Bwh	- Clima de deserto quente
cm	- Centímetro
h	- Hora
hPa	- Hectopascal
J/kg	- Joule por quilograma
km	- Quilômetro
km ²	- Quilômetro quadrado
m/s	- Metro por segundo
mim	- Minuto
mm	- Milímetros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
2. METODOLOGIA.....	5
2.1 Área de estudo	5
2.2 Dados utilizados na confecção dos resultados	7
2.3 Distribuição espacial e temporal	7
2.4 Estudo de caso	8
3. RESULTADOS	9
3.1 Distribuição espacial e temporal de granizo	9
3.2 Estudo de caso: Tempestade de Granizo de 3 de outubro de 2022.....	17
4. CONCLUSÃO.....	23
5. REFERÊNCIAS	25

1. INTRODUÇÃO

O granizo é um fenômeno meteorológico com alto potencial destrutivo, capaz de afetar telhados, veículos, linhas de energia elétrica, lavouras, pessoas e animais. No setor agrícola, é considerado uma das principais causas de perdas econômicas (Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009).

A relevância desse problema pode aumentar, visto que a elevação da temperatura média global tende a alterar os padrões convectivos e intensificar eventos de tempestades severas (Punge; Kunz, 2016; Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009). Nesse contexto, estudo como o de Dessens (1995) já aponta para um possível aumento na frequência e intensidade do granizo como consequência das mudanças climáticas.

O granizo consiste em uma precipitação sólida formada no interior de nuvens convectivas do tipo Cumulonimbus, que se caracterizam por seu acentuado desenvolvimento vertical, frequentemente ultrapassando 12 km de altitude (Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg, S. D., 2009).

A ocorrência de granizo tipicamente pode ser encontrada em tempestades isoladas ou, em escala mais ampla, pelos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM). Estes últimos consistem em extensos agrupamentos de tempestades severas, organizadas e persistentes, particularmente comuns nas regiões tropicais e subtropicais (Maddox, 1980; Velasco; Fritsch, 1987).

Fisicamente, a formação do granizo inicia-se com a criação do núcleo de gelo, que possui um papel fundamental para a gênese do futuro granizo (Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009). Este processo inicial, ocorre quando o vapor d'água congela sobre partículas de aerossóis em suspensão (nucleação heterogênea) ou passa diretamente do estado gasoso para o sólido (deposição) (Ferreira, 2010).

O crescimento inicial deste núcleo se dá por acreção, onde novas gotículas de água super-resfriadas se congelam ao colidirem com núcleo (Ferreira, 2010). Este processo dá origem ao embrião, que na maioria dos casos é um grânulo de gelo, conhecido como graupel (Knight, C. A.; Knight, N. C., 1970).

A etapa fundamental que transforma o embrião inicial em granizo depende da dinâmica da nuvem. Este embrião é transportado por fortes correntes ascendentes para um novo conjunto de condições dentro da tempestade (Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009; Knight, C. A.; Knight, N. C., 1970). O ambiente turbulento dentro das nuvens Cumulonimbus mantém a partícula suspensa, fazendo-a atravessar repetidamente as zonas de crescimento (Guo

et al., 2002). Cada passagem do cristal de gelo permite que novas camadas de gelo se formem em torno do núcleo original, seja por acreção ou deposição (Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009; Ferreira, 2010).

Finalmente, quando o peso do granizo excede a força das correntes ascendentes que o sustentavam, ele precipita em direção ao solo (Guo *et al.*, 2002). As dimensões do granizo podem variar amplamente, de pequenos fragmentos com 0,5 cm até pedras com mais de 20 cm de diâmetro. Entretanto, a maioria dos eventos reportados de granizo apresenta diâmetros a partir de 2 cm (Ghasemifard *et al.*, 2024).

No contexto global, eventos de granizo são mais frequentes em regiões de elevada instabilidade atmosférica, como é o caso da região central dos Estados Unidos (conhecida como "Tornado Alley") (Allen *et al.*, 2020). Nesta área, a formação de tempestades severas é favorecida pela combinação de gatilhos dinâmicos (como sistemas frontais e linhas de instabilidade) com um ambiente termodinâmico local propício. Essa interação é responsável por gerar correntes ascendentes intensas necessárias para a formação de granizo (Punge; Kunz, 2016). Além disso, variações climáticas têm influenciado a distribuição geográfica desses eventos, com estudos indicando um possível aumento na intensidade de granizo em latitudes médias devido ao aquecimento global (Punge; Kunz, 2016).

No Brasil, os episódios de granizo concentram-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste. A formação dessas tempestades convectivas intensas é favorecida pela interação entre sistemas frontais e o intenso transporte de umidade da Amazônia, frequentemente canalizado pelo Jato de Baixos Níveis (JBN) (Martins *et al.*, 2017). Em centros urbanos densamente povoados como São Paulo, observa-se a presença do fenômeno conhecido como ilha de calor urbano, devido à impermeabilização do solo, à presença de edificações e à emissão de poluentes (Barros; Lombardo, 2016; Assis; Abreu, 2010). Esse aquecimento localizado intensifica os gradientes térmicos e pode favorecer a formação de correntes ascendentes na atmosfera, o que contribui para o aumento da instabilidade convectiva. Como consequência, há um maior potencial para o desenvolvimento de nuvens propícias à formação de precipitação intensa e, em alguns casos, de granizo. Portanto, o efeito das ilhas de calor não apenas modifica o microclima urbano, mas também atua como um fator adicional que pode intensificar ou antecipar a ocorrência de tempestades severas, elevando o risco de danos em áreas urbanas densamente ocupadas (Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009). Embora menos frequentes, registros de granizo também são observados no Centro-Oeste, geralmente associados a sistemas de grande escala que atuam durante o verão (Barros; Balero, 2013).

Em Minas Gerais (MG), estudos recentes têm contribuído para o entendimento sobre as características das tempestades de granizo no estado. Um destes estudos é o de Silva et al. (2022), que analisou um evento ocorrido em Santa Rita do Sapucaí (MG), em outubro de 2019, caracterizando as condições atmosféricas e os mecanismos associados à formação do granizo. Os autores identificaram que, embora a energia potencial convectiva disponível (*Convective Available Potential Energy* - CAPE) não fosse extrema (com valor de 468,86 J/kg), a tempestade foi intensificada por fortes fatores dinâmicos, como a divergência do vento em altos níveis e a presença de forte cisalhamento vertical do vento (0-6 km), que propiciaram os movimentos ascendentes na coluna atmosférica.

Do mesmo modo foi destacado pelo estudo a presença do JBN e da convergência de umidade proveniente do Atlântico, aliada à topografia local, exerce papel na intensificação da convecção (Silva et al., 2022).

Outro estudo que igualmente contribuiu foi o de Pereira *et al.* (2024), que analisou um evento de granizo ocorrido em Itajubá (MG), em 13 de outubro de 2020, caracterizando o ambiente sinótico e as propriedades microfísicas da tempestade. Os autores identificaram um ambiente com elevada instabilidade, onde a CAPE atingiu 2739 J/kg. A tempestade foi intensificada por fortes fatores dinâmicos, incluindo um cavado de onda curta em altos níveis e um cavado invertido na superfície. Estes sistemas, aliados a um forte cisalhamento vertical do vento (entre 10 e 20 m/s na camada 500-1000 hPa), propiciaram os movimentos ascendentes e a intensificação da convecção.

Além dos fatores dinâmicos previamente descritos, o estudo destacou a presença de umidade na atmosfera (com valores de 50-70% na camada 850-500 hPa). A combinação desses elementos resultou em uma tempestade severa que produziu granizo com 5 cm de diâmetro (Pereira *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços significativos no entendimento das tempestades de granizo em MG, a literatura existente apresenta importantes limitações. A maioria dos estudos concentra-se em análises pontuais de eventos isolados, como demonstrado por Silva *et al.* (2022) e Pereira *et al.* (2024) em seus trabalhos sobre tempestades severas. Essa abordagem fragmentada resulta em uma lacuna significativa no entendimento abrangente dos padrões espaço-temporais, das condições sinóticas precursoras e dos mecanismos físicos específicos que governam a ocorrência de granizo no estado.

Nesse contexto, a ocorrência de eventos de granizo pode impactar significativamente diversos aspectos da economia mineira. Na agricultura, os prejuízos são particularmente severos em cultivos sensíveis, como o café e as frutíferas, onde pedras de gelo podem destruir

lavouras inteiras em poucos minutos (Abrafrutas, 2023). Na região metropolitana de Belo Horizonte, os danos à infraestrutura urbana, incluindo telhados residenciais, sistemas elétricos e frota veicular, representam desafios constantes para a defesa civil (CEMIG, 2017; Minas Gerais, 2023).

A análise da distribuição espacial e temporal de granizo numa determinada região é importante, pois permite caracterizar os mecanismos atmosféricos em múltiplas escalas, identificar os fatores determinantes para a intensidade dos eventos e estabelecer comparações com outros casos documentados na literatura. Esta abordagem justifica-se diretamente pela lacuna significativa identificada na literatura. A ausência de estudos sobre os padrões abrangentes do granizo no estado impõe a necessidade crítica de produzir um conhecimento que sirva, simultaneamente, à compreensão científica do fenômeno e às aplicações práticas em gestão de riscos. Como destacado por Marengo (2001), o aumento projetado na frequência de eventos extremos sob cenários de mudanças climáticas torna imperativo o desenvolvimento de estudos regionais detalhados que possam subsidiar políticas públicas eficazes de prevenção e mitigação, especialmente em regiões economicamente estratégicas como MG.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as características, temporal e espacial, da ocorrência de granizo no estado de MG. E como objetivos específicos:

- 1) Caracterizar a distribuição espacial e temporal de granizo em MG durante o período de agosto de 2018 a junho de 2023.
- 2) Avaliar o ambiente sinótico precursor da tempestade que afetou a Rodovia Fernão Dias no dia 3 de outubro de 2022.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O presente estudo tem como foco o estado de MG tendo sua área de análise abrangendo todas as mesorregiões, conforme está ilustrado na Figura 1. Essa figura apresenta a posição geográfica de MG em relação ao território nacional e a divisão administrativa por mesorregiões. O estado destaca-se por sua diversidade topográfica, como visualizado na Figura 2, a qual exerce influência direta na variabilidade climática regional (Reboita *et al.*, 2015). Além disso, essa topografia acidentada também é um fator determinante na formação de eventos meteorológicos extremos, como as tempestades de granizo (Silva *et al.*, 2022).

O estado de Minas Gerais abrange uma área de 586.528 km² (IBGE, 2022) onde vivem aproximadamente 21,4 milhões de habitantes (IBGE, 2025), configurando-se como o segundo estado mais populoso do país. As principais atividades econômicas do estado incluem o agronegócio, com destaque para a produção de café (o maior produtor nacional), leite, cana-de-açúcar e cultivos de frutas (EMATER-MG, 2024), turismo em cidades históricas como Ouro Preto e a indústria mineral e siderúrgica (o principal produtor nacional de minério de ferro), além do setor de serviços (IBGE, 2025).

Figura 1 - Localização do estado de Minas Gerais e suas mesorregiões.

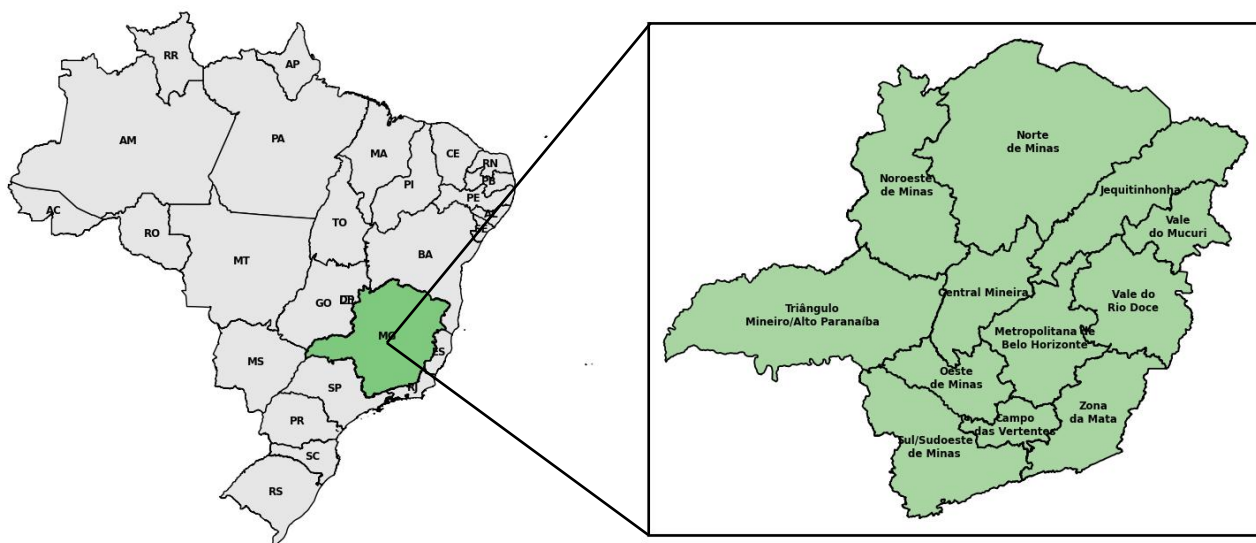
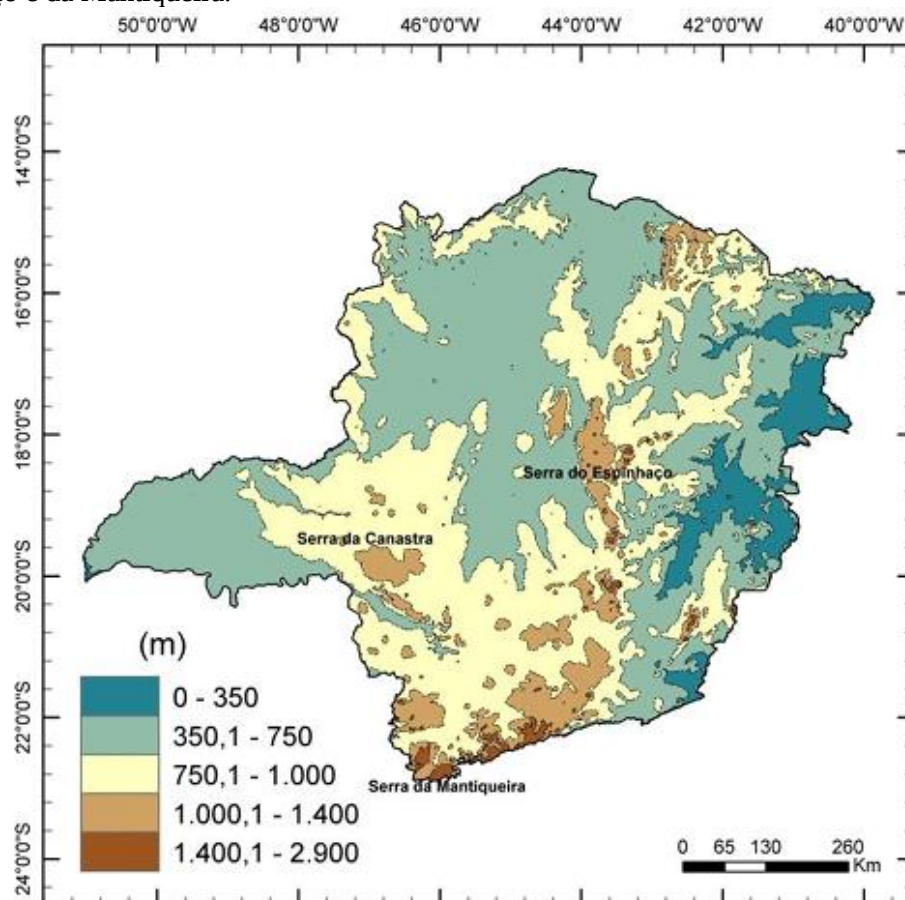


Figura 2 - Mapa de relevo (metros) do estado de Minas Gerais, indicando as serras da Canastra, do Espinhaço e da Mantiqueira.



Fonte: Reboita *et al.* (2015).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima de MG é definido como: predomínio do clima tropical de savana com inverno seco (Aw) na maior parte do território. Contudo, por influência da altitude, as porções sul (como a Serra da Mantiqueira) e a região da Serra do Espinhaço são dominadas pelos climas temperado quente com inverno seco e verões quentes (Cwa) e climas temperado quente com inverno seco e verões não muito quentes (Cwb). O extremo norte apresenta ainda pequenas áreas de clima de estepes e de deserto (BSh e BWh) (Reboita *et al.*, 2015).

Essa diversidade gera contrastes sazonais significativos, especialmente na precipitação: as chuvas concentram-se no período de outubro a março, estação em que o acumulado no centro-sul pode alcançar 900 mm, enquanto o inverno é marcado por baixos índices, reduzindo os valores na mesma região para aproximadamente 50 mm (Reboita *et al.*, 2015). É justamente nessa região centro-sul que a ocorrência recorrente de sistemas convectivos e frentes frias (Nogueira *et al.*, 2024) torna o estado mais suscetível a granizo.

2.2 Dados utilizados na confecção dos resultados

No levantamento das ocorrências, foi consultado o banco de dados da Plataforma de Registros de Tempo Severo (PRETS, 2024). Este banco de dados fornece registros sistemáticos de tempestades severas em todo o território brasileiro. Os registros do PRETS são obtidos a partir de fontes tradicionais, como notificações da Defesa Civil e observações de estações meteorológicas. A partir de junho de 2018, a coleta foi expandida, incluindo ativamente registros de redes sociais e reportagens da mídia com foco em tempo severo (rajadas de vento, granizo e tornados). Todos os relatos passam por um processo de validação e georreferenciamento antes de serem incorporados ao sistema. Neste trabalho, foram selecionados exclusivamente os registros de granizo ocorridos dentro dos limites de MG.

Para analisar os campos sinóticos representativos do período em que ocorreram eventos de granizo, foram empregados dados horários oriundos da *Fifth Generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Atmospheric Reanalysis* (ERA5), que corresponde à Quinta Geração da Reanálise Atmosférica do ECMWF (HERSBACH, H. *et al.*, 2020). Esta reanálise é disponibilizada publicamente pelo *Copernicus Climate Change Service* (Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus-C3S) e possui uma resolução espacial de $0,25^\circ$.

As variáveis utilizadas foram: geopotencial, componentes zonal e meridional do vento, velocidade vertical, componentes do vento a 10 metros de altura, pressão ao nível médio do mar e CAPE. Estes dados foram empregados para confeccionar os campos de jato, cisalhamento do vento e a própria CAPE.

Foi analisado o horário das 18:00 UTC (*Coordinated Universal Time*) do dia 3 de outubro de 2022, correspondente ao período de ocorrência do evento selecionado.

A análise dos campos sinóticos concentrou-se nos seguintes produtos derivados do ERA5: jatos em altos níveis (250 hPa), cisalhamento vertical do vento entre 1000 e 500 hPa, e CAPE. Além disso, foram analisadas cartas sinóticas elaboradas pela Marinha do Brasil (MB).

2.3 Distribuição espacial e temporal

A distribuição espacial e temporal dos eventos de granizo foi examinada com base nos registros do banco de dados de evento severo da PRETS. A análise teve como objetivo caracterizar o comportamento dos eventos quanto à frequência temporal e à localização, contribuindo para a identificação de padrões sazonais e regionais da ocorrência do fenômeno em MG.

Em termos da análise temporal, foram analisadas a ocorrência de granizo nas escalas horaria, mensal, sazonal e anual dos eventos registrados, com destaque para os meses de primavera e verão, nos quais predominam condições atmosféricas favoráveis à instabilidade e à convecção intensa.

A análise espacial envolveu a geolocalização dos eventos e a subsequente agregação por mesorregiões administrativas do estado. Essa abordagem permitiu identificar áreas com maior concentração de ocorrências, o que é fundamental para a elaboração de políticas públicas voltadas à prevenção e à mitigação de danos associados ao granizo.

Essa caracterização integrada fornece subsídios para a identificação de zonas de risco e para o planejamento de ações estratégicas de defesa civil, promovendo a resiliência frente aos desastres naturais de origem meteorológica.

2.4 Estudo de caso

A partir dos registros de granizo do banco PRETS, selecionou-se como estudo de caso o evento de 3 de outubro de 2022, com início às 17:15 UTC. A escolha deste episódio justifica-se por sua ampla abrangência territorial, que atingiu 53 municípios, e pelo notório impacto na infraestrutura rodoviária, afetando a Rodovia Fernão Dias no trecho entre São Gonçalo do Sapucaí e Três Corações.

Inicialmente, realizou-se uma descrição geral do evento, incluindo informações sobre a extensão dos danos como os impactos observados em infraestrutura, regiões agrícolas e nas áreas urbanas. Em seguida, foram examinadas as condições atmosféricas predominantes no horário das 18:00 UTC, representando o momento de ocorrência do evento analisado. Foi realizada uma análise sinótica baseada nas cartas sinóticas da MB e nos dados da reanálise do ERA5, a fim de identificar os principais mecanismos dinâmicos associados à formação do sistema.

3. RESULTADOS

3.1 Distribuição espacial e temporal de granizo

A Figura 3 mostra a distribuição espacial dos 1.938 eventos de granizo que foram registrados entre 2018 e 2023 no estado de MG. Os resultados indicam a existência de uma distribuição espacial heterogênea do granizo. Como demonstra na Figura 4, observa-se uma expressiva concentração de ocorrências de granizo nas porções Sul e Sudoeste do estado (563 casos). Em contrapartida, as mesorregiões situadas no norte e noroeste do estado apresentam densidade significativamente inferior de registros, o que sugere menor suscetibilidade a episódios de granizo.

A distribuição espacial dos eventos de granizo observada está associada aos mecanismos climatológicos e geográficos que favorecem a convecção intensa nessas áreas. Estudos prévios indicam que as regiões Sul e Sudeste do Brasil apresentam maior propensão à ocorrência de granizo devido às interações de sistemas sinóticos. Estes incluem sistemas frontais e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), que são frequentemente alimentados pelo intenso transporte de umidade da Bacia Amazônica, canalizado pelo JBN (Salio *et al.*, 2007; Caldana *et al.*, 2019).

Além disso, a topografia acidentada de MG (Figura 2) exerce influência direta na variabilidade climática regional. Ela favorece, por exemplo, o desenvolvimento de circulações locais (Reboita *et al.*, 2015) e também atua como um fator determinante na formação de eventos meteorológicos extremos, como as tempestades de granizo (Silva *et al.*, 2022).

Outro aspecto relevante é observado em grandes centros urbanos, como a Região Metropolitana de Belo Horizonte, onde o efeito de ilha de calor urbana intensifica gradientes térmicos e a instabilidade convectiva, podendo antecipar ou agravar tempestades (Changnon S. A.; Changnon D.; Hilberg S. D., 2009).

A menor frequência de ocorrências de granizo na região Norte de MG, em comparação com o Sul do estado, é um fenômeno explicado por um claro contraste climatológico. O Norte de MG, com predomínio de clima Aw, apresenta condições atmosféricas distintas das do Sul do estado, que possui um clima tropical de altitude Cwa e Cwb (Reboita *et al.*, 2015). Essa diferença deve-se também à fraca penetração de sistemas meteorológicos de latitudes médias, como frentes frias e cavados, na porção norte do estado (Jardim; Moura, 2018; Klemp, 1987). Estudo climatológico da região Sudeste do Brasil demonstram que apenas cerca de 30% das frentes frias que passam pelo Sul do Brasil conseguem avançar até o Sul de MG (Nogueira *et*

al., 2024). Essa baixa influência frontal e a predominância de mecanismos tropicais (Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e convecção isolada) na porção norte do estado explicam a climatologia local, na qual os eventos de precipitação extrema ocorrem, mas a incidência de granizo destrutivo é significativamente reduzida (Jardim; Moura, 2018; Klemp, 1987; Silva et al., 2020).

Figura 3 – Distribuição espacial do total de ocorrências de granizo no estado de Minas Gerais no período de 2018 a 2023. No mapa é mostrado a quantidade de granizo registrado em todo período de estudo e os contornos das mesorregiões são representados com linhas contínuas na cor preta.

Distribuição Espacial de Granizo para todo o período de 2018 a 2023

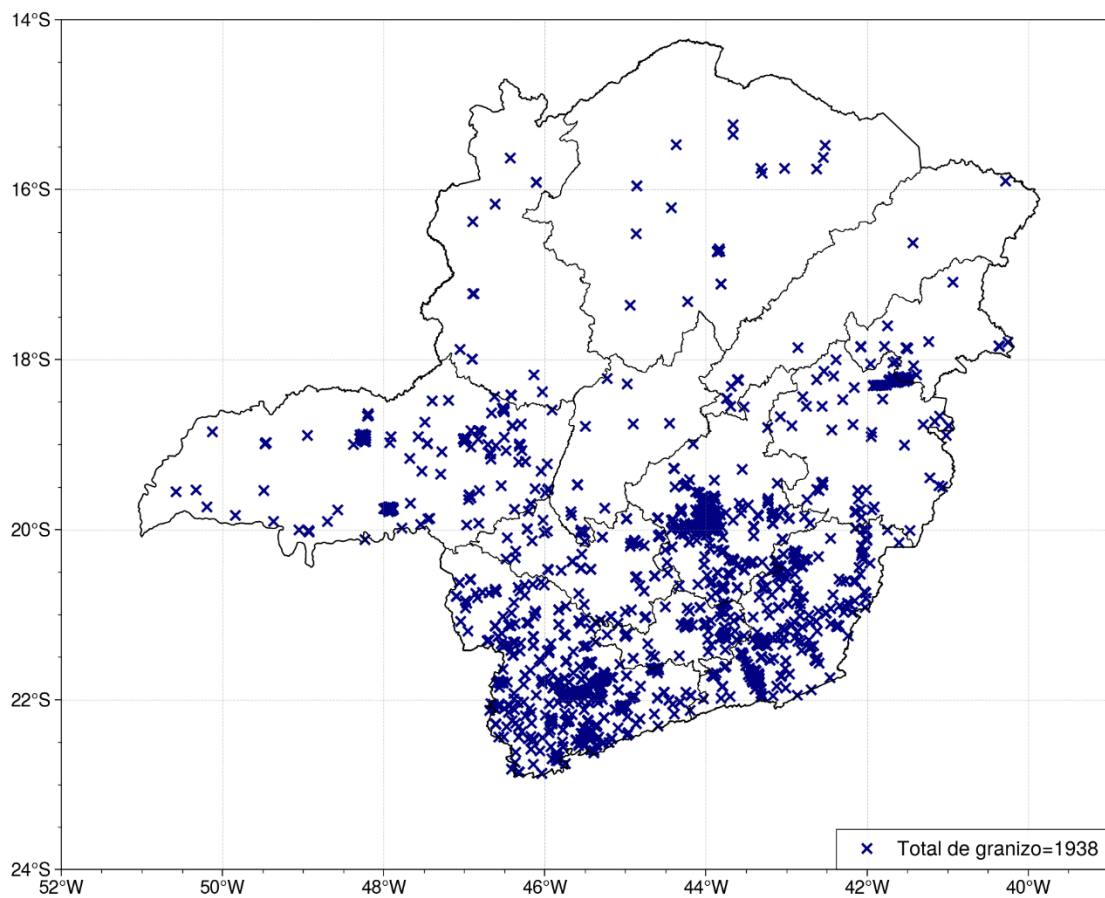
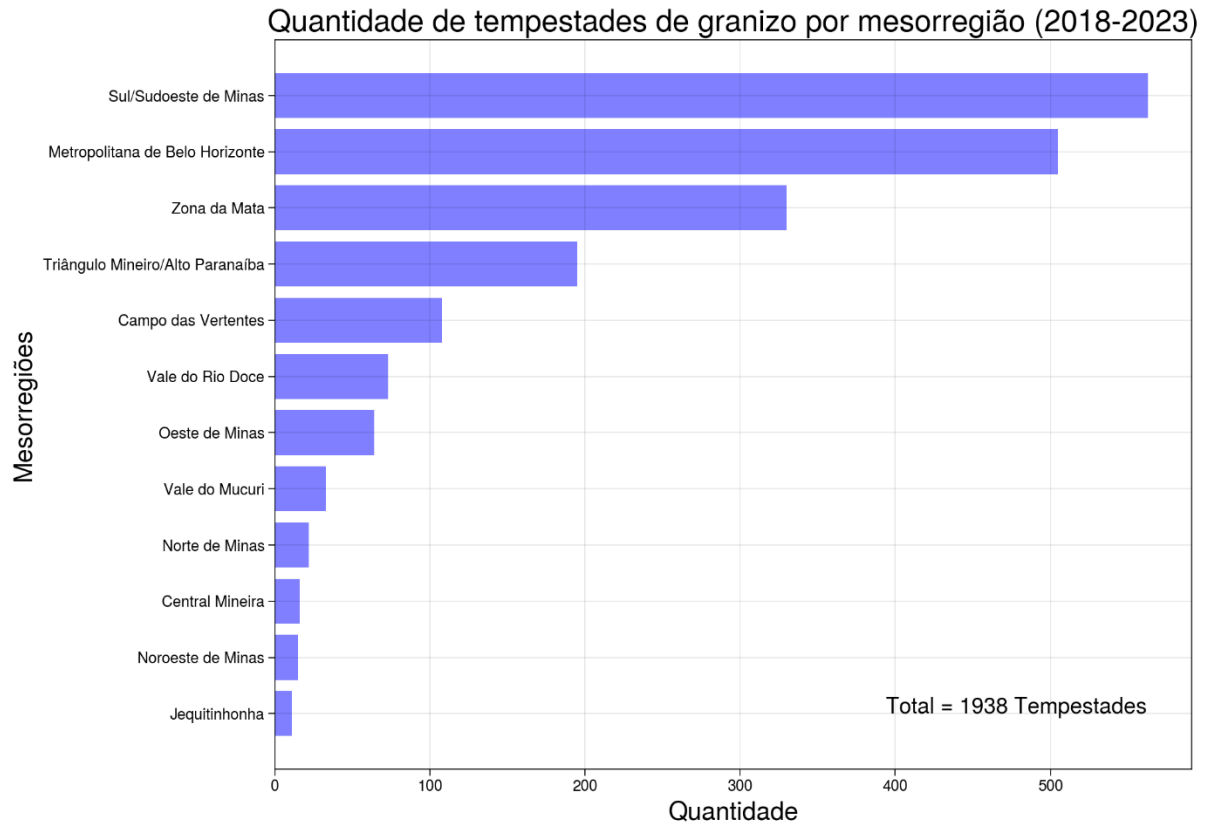


Figura 4 - Distribuição de ocorrências de granizo para cada mesorregião de Minas Gerais no período de 2018 a 2023.



A distribuição anual das ocorrências de granizo em MG (Figura 5) revela um aumento entre 2018 (85 registros) e 2022 (255 registros), com destaque para os anos de 2020 a 2022. Parte desse aumento pode ser atribuído à melhoria na coleta e sistematização dos dados.

Contudo, outro fator importante é a variabilidade climática associada ao fenômeno *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS). O ENOS é um fenômeno de grande escala que representa o forte acoplamento oceano-atmosfera no Pacífico Equatorial, possuindo duas fases opostas: *El Niño* (a "fase quente", marcada por um aquecimento das águas do oceano Pacífico) e *La Niña* (a "fase fria", marcada por um resfriamento das águas do oceano Pacífico) (Minuzzi *et al.*, 2006). O período de alta acentuada nos registros (2020-2022) coincide com a atuação de um evento de *La Niña*, enquanto os anos anteriores com menos registros (2018-2019) foram marcados por um *El Niño* (GOLDEN GATE WEATHER SERVICES, 2024).

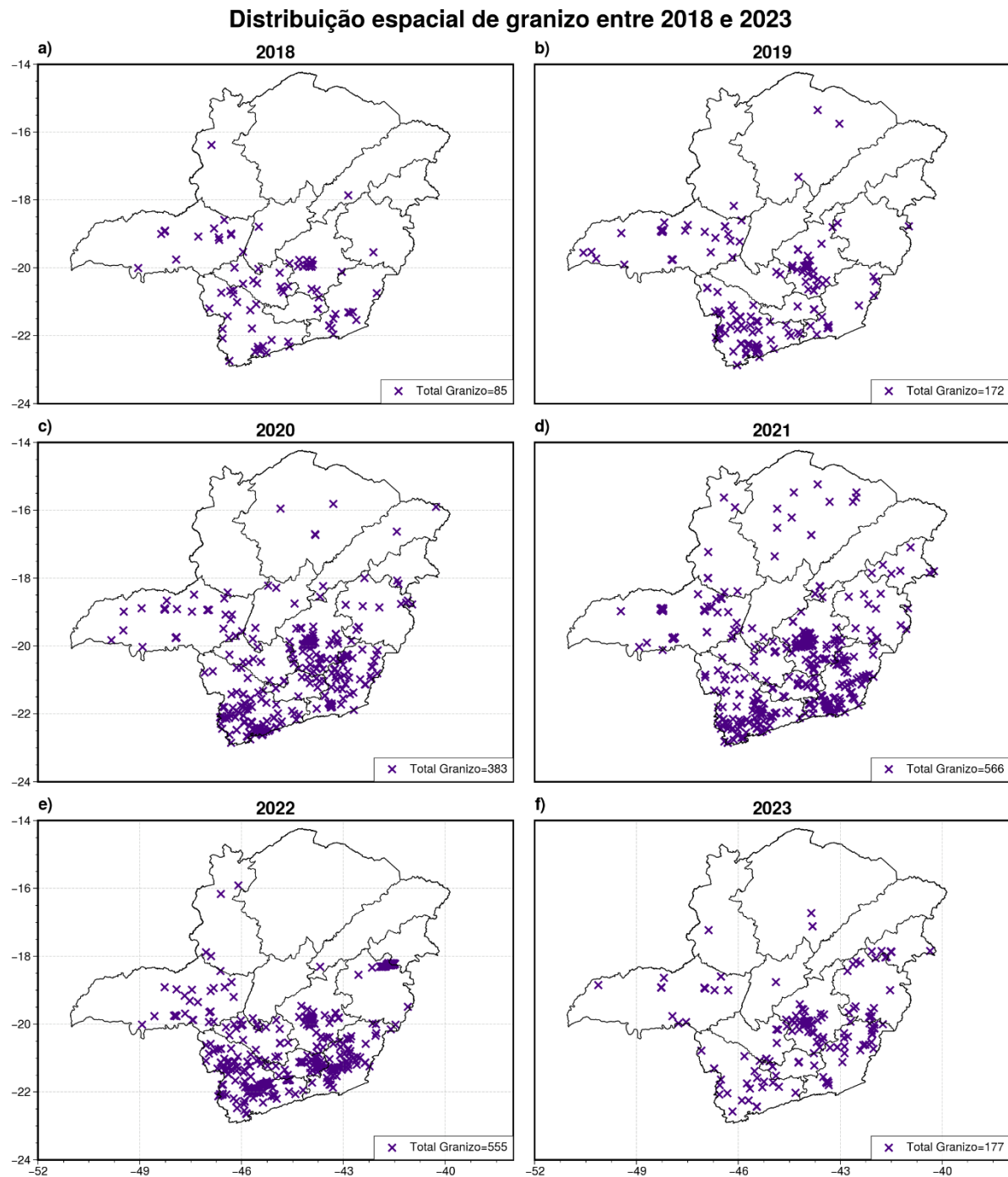
De acordo com Minuzzi, *et al.* (2006) esta observação é consistente com a climatologia da Região Sudeste, onde indica que episódios de *El Niño* tendem a suprimir a precipitação em partes de MG (especialmente norte e nordeste) e podem alterar a duração da estação chuvosa. Esses fatores impactam diretamente a frequência das condições atmosféricas necessárias para

a formação de tempestades severas, justificando a menor quantidade de registros observados nos anos de *El Niño*.

Embora exista essa limitação e seja necessário um período de 20 anos para uma análise temporal detalhada, o presente resultado é consistente com as evidências globais que apontam para uma intensificação de eventos convectivos severos associados às mudanças climáticas. Esses estudos indicam que o aquecimento eleva a CAPE, aumentando a frequência de ambientes favoráveis a tempestades de granizo em diferentes regiões (Punge; Kunz, 2016; Trapp *et al.*, 2007; Allen, 2018). Conforme demonstrado no estudo de Marengo (2001) o aquecimento global pode aumentar a frequência e a intensidade das tempestades severas no Brasil.

O ano de 2021 se destaca como o mais crítico, com 566 registros de granizo, refletindo não apenas a melhor cobertura dos sistemas de observação, mas também a atuação da *La Niña*. Nos anos seguintes, verifica-se uma estabilização em 2022 e uma redução de registros em 2023. A redução não reflete necessariamente uma tendência real da região, mas sim a incompletude dos registros e as limitações dos sistemas.

Figura 5 – Distribuição espacial do granizo para os anos de (a-f) 2018 a 2023 para o estado de MG. Em cada mapa é mostrado a quantidade de granizo registrado em cada ano e os contornos das mesorregiões são representados com linhas contínuas na cor preta.



Na Figura 6 apresenta-se o ciclo mensal das tempestades de granizo em MG, tendo a maior frequência entre outubro e janeiro (1216 casos registrados neste período), que coincide com a estação chuvosa típica da região Sudeste do Brasil. Nestes meses, a combinação entre temperaturas elevadas, alta umidade atmosférica e a intensa convecção, criam condições propícias para a formação de tempestades severas com ocorrências de granizo (Pereira *et al.*,

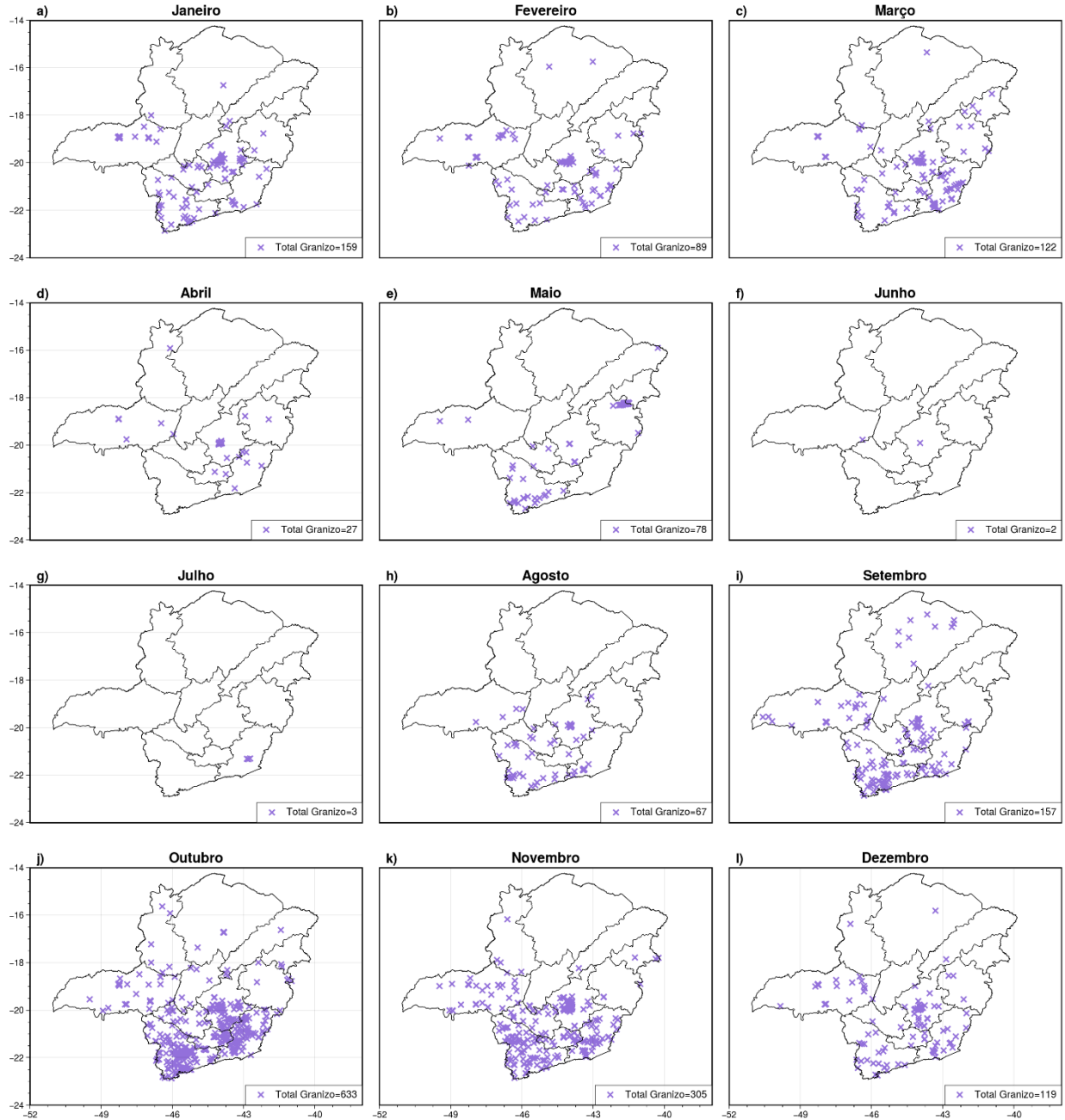
2024; Changnon, S. A.; Changnon, D.; Hilberg S. D., 2009). Em uma análise profunda, destaca-se o mês de outubro como o mais crítico, com 633 casos. Neste mês se encontra a estação da primavera, que é uma estação de transição entre o inverno e o verão. Este período de transição fornece tanto uma CAPE elevada (que atua como "combustível") quanto o forte cisalhamento vertical do vento (que é o mecanismo dinâmico que "organiza" a estrutura das tempestades severas) (Nascimento, 2005; Martins *et al.*, 2017). O cisalhamento vertical atua como o mecanismo dinâmico que organiza a estrutura das tempestades severas, mas é crucial notar que deve estar em um intervalo crítico de valores, um cisalhamento excessivamente forte pode, na verdade, desorganizar ou inibir o desenvolvimento da convecção (Nascimento, 2005).

Em contrapartida no inverno, de junho a agosto, houve uma diminuição de ocorrência nos eventos de granizo, onde foram registrados 72 casos. A diminuição desses eventos está ligada à atuação da alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que se posiciona sobre o continente e inibe o desenvolvimento convectivo (Reboita *et al.*, 2015). Essa sazonalidade é coerente com o regime de precipitação do Sudeste, correspondendo ao período seco (Alvares *et al.*, 2013).

Eventos de granizo exigem uma combinação de valores de CAPE e forte cisalhamento vertical do vento para sustentar as tempestades. No período de outubro a janeiro, a região do Oeste de MG é marcada por uma dinâmica atmosférica insuficiente desses valores (Klemp, 1987). A principal causa dessa insuficiência é a atenuação da atividade frontal à medida que o verão se instala. No estudo climatológico de Nogueira, *et al.* (2024), demonstrou-se que a frequência de frentes frias ativas que penetram no estado diminui drasticamente neste período. Com ausência da forçante baroclínica suprime-se o cisalhamento vertical do vento necessário para a organização das tempestades severas.

Figura 6 - Distribuição espacial de granizo para os meses de (a-f) janeiro a dezembro para o estado de MG entre o período de 2018 e 2023. Em cada mapa é mostrado o total de granizo registrado em cada mês considerando todos os anos e os contornos das mesorregiões são representados com linhas contínuas na cor preta.

Distribuição espacial de granizo por mês (2018–2023)

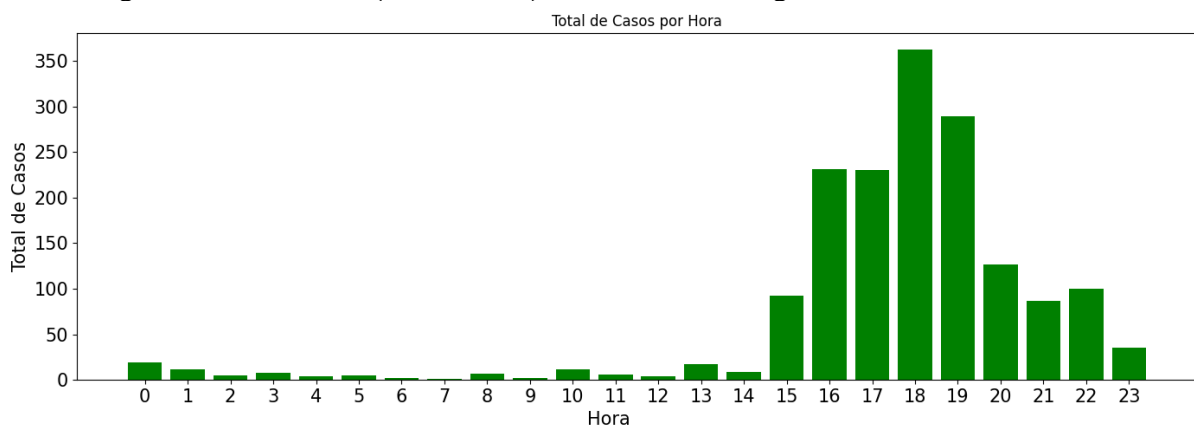


A análise da Figura 7 evidencia o pico de ocorrência de tempestades que se concentra às 18:00 (horário local). Este padrão reflete a resposta da atmosfera ao ciclo diurno de aquecimento, embora a radiação solar atinja seu máximo no início da tarde, exigindo uma defasagem temporal necessária para que a convecção se desenvolva e as nuvens atinjam a

maturidade capaz de produzir granizo, resultando na concentração de eventos no final da tarde e início da noite (Martins *et al.*, 2017).

Por outro lado, a menor incidência de eventos ocorre entre a madrugada (00:00) e o final da manhã (12:00). A estabilização da atmosfera, causada pelo resfriamento radiativo da superfície, suprime a convecção necessária para a formação de tempestades nesses horários. O padrão é corroborado por Martins *et al.* (2017), que demonstram que o ciclo diário do granizo é regido pelo aquecimento solar, resultando em mínimos pela manhã e picos de atividade no final da tarde (entre 15h e 21h).

Figura 7 - Ciclo diurno (horário local) das ocorrências de granizo no estado de Minas Gerais.

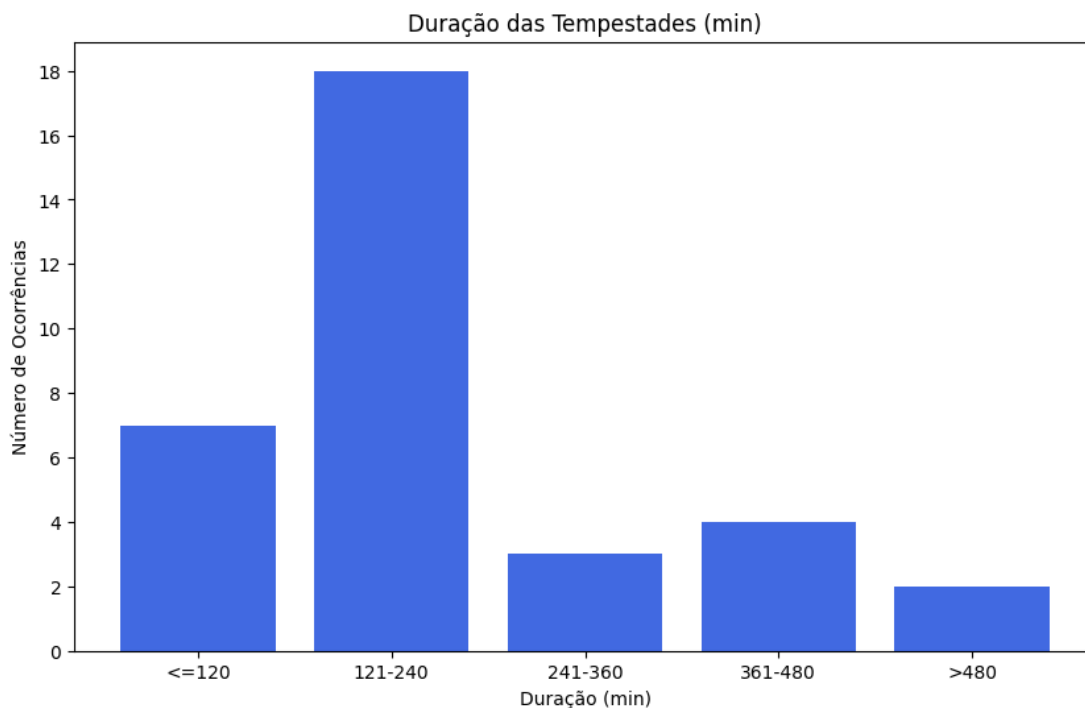


A Figura 8 demonstra a distribuição da duração dos eventos de granizos, registrados na plataforma PRETS. Para a estimativa dessas durações mais longas (superiores a 120 minutos), foi aplicado um filtro de agrupamento baseado na proximidade espacial (latitude e longitude) e temporal de dois ou mais registros. Diante disso, é importante ressaltar que esta metodologia apresenta limitações, embora o filtro espacial busque conectar registros do mesmo sistema, existe a possibilidade de que tempestades distintas, ocorrendo em locais próximos e horários similares, tenham sido agrupadas como um único evento. Portanto, a confirmação exata da continuidade desses sistemas exigiria uma validação individual detalhada, possivelmente com o uso de rastreamento por radar ou satélite.

Destaca-se na figura a presença de registros com durações estendidas, notadamente na faixa de 121 a 240 minutos. Estes eventos tem uma relevância meteorológica, pois indicam a atuação de sistemas convectivos organizados. Segundo Klemp (1987), o fator essencial que permite que as tempestades organizadas desenvolvam uma estrutura quase estacionária e persistam por várias horas é o forte cisalhamento vertical do vento. Este cisalhamento promove

a separação física da corrente ascendente e da corrente descendente, o que sustenta a convecção e a longevidade da tempestade.

Figura 8 – Histograma de frequência da duração das tempestades de granizo, separadas em classes de I) menores que 120 min, II) 121-240 min, III) 241-360, IV) 361-480 e V) maiores que 480.



3.2 Estudo de caso: Tempestade de Granizo de 3 de outubro de 2022

No dia 3 de outubro de 2022, às 14:15 (horário local) ocorreu uma tempestade que produziu granizo no Sul de MG. De acordo com registros da plataforma PRETS, a tempestade afetou 53 municípios, conforme mostrado na Figura 9, sendo eles: Pouso Alegre, Silvianópolis, Turvolândia, São Gonçalo do Sapucaí, Campanha, Cambuquira, Lambari, Careçu, Santos Dumont, Aracitaba, Tabuleiro, Três Corações, Carrancas, Minduri, Mercês, Rio Pomba, Bambuí, Tapira, Luminárias, Tocantins, Ubá, Rodeiro, Campo do Meio, Ilícinea, Visconde de Rio Branco, Guaraciaba, Ibertioga, Machado, Guiricema, Cabo Verde, Poço Fundo, Ervália, Antônio Carlos, Barbacena, Alfenas, Ponte Nova, Senhora das Dores, Conceição do Rio Verde, Alfredo Vasconcelos, Dores de Campos, Senador Firmino, Alto Rio Doce, São João del Rei, Paula Cândido, Nepomuceno, Coimbra, Viçosa, Cajuri, Soledade de Minas, Capetinga, Porto Firme, Silvestre, Urucânia. Esse evento ocasionou danos à infraestrutura urbana, prejuízos agrícolas e interrupções no sistema viário. Destacando-se o trecho da Rodovia Fernão Dias -

BR-381, que foi encoberto por granizo, gerando congestionamentos e riscos à segurança viária, conforme relatado pelo G1 Sul de Minas, 2022.

Figura 9 –Localidades afetadas pela ocorrência de granizo em 3 de outubro de 2022.
Municípios afetados pelo evento de granizo em Minas Gerais

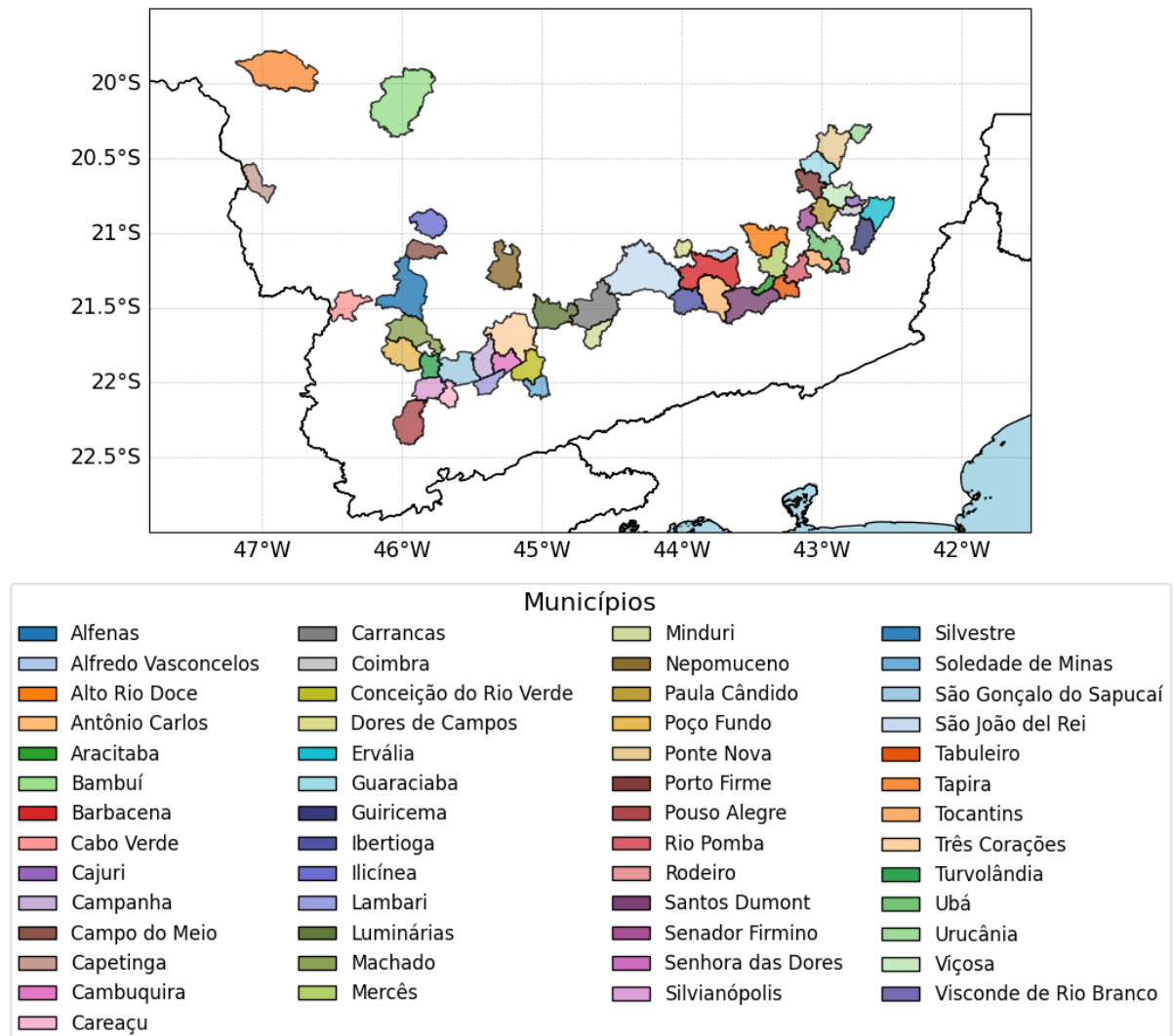


Figura 10a o registro dos granizos, já na Figura 10b é mostrado acúmulo expressivo de gelo na rodovia. Esse fenômeno, embora relativamente raro no Brasil, é característico de tempestades severas organizadas, como supercélulas e SCM (Brooks, *et al.*, 2003; Caldana, *et al.*, 2019).

Figura 10 – Fotos da ocorrência de granizo no estado de Minas Gerais no dia 03/10/2022: (a) tamanho e forma dos granizos registrados e (b) acumulação de granizo na BR 381 (Rodovia Fernão Dias).

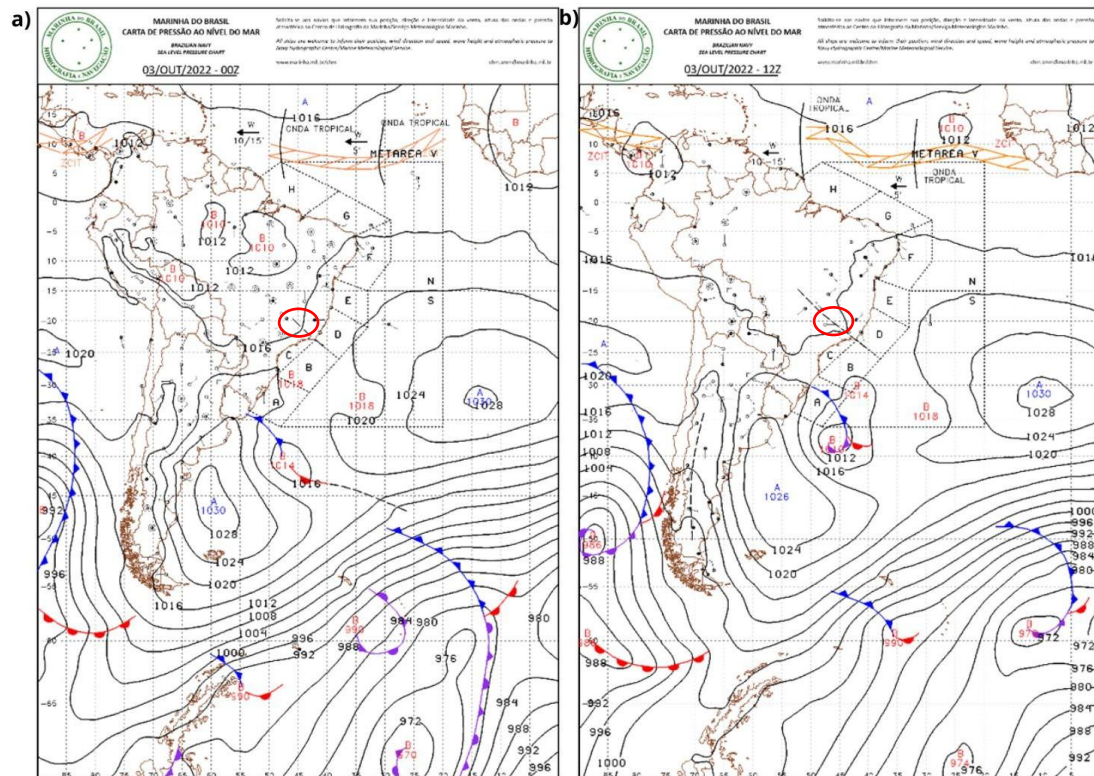


Fonte: G1 Sul de Minas (2022).

As cartas sinóticas disponibilizadas pela MB (Figura 11) indicam a atuação de um cavado invertido sobre a região de estudo, entre 00:00 UTC e 12:00 UTC do dia 3 de outubro de 2022.

O cavado invertido é um sistema sinótico de superfície definido como uma área de baixa pressão que se estende para o norte, ao contrário de um cavado tradicional. Tendo sua importância na formação de tempestades severas, sendo ele que atua como um mecanismo dinâmico que contribui para a convergência dos ventos em baixos níveis da atmosfera. Essa convergência força o ar a subir, ajudando a organizar os movimentos ascendentes na atmosfera, o que serve de gatilho para disparar a instabilidade e formar tempestades intensas (Pereira *et al.*, 2024).

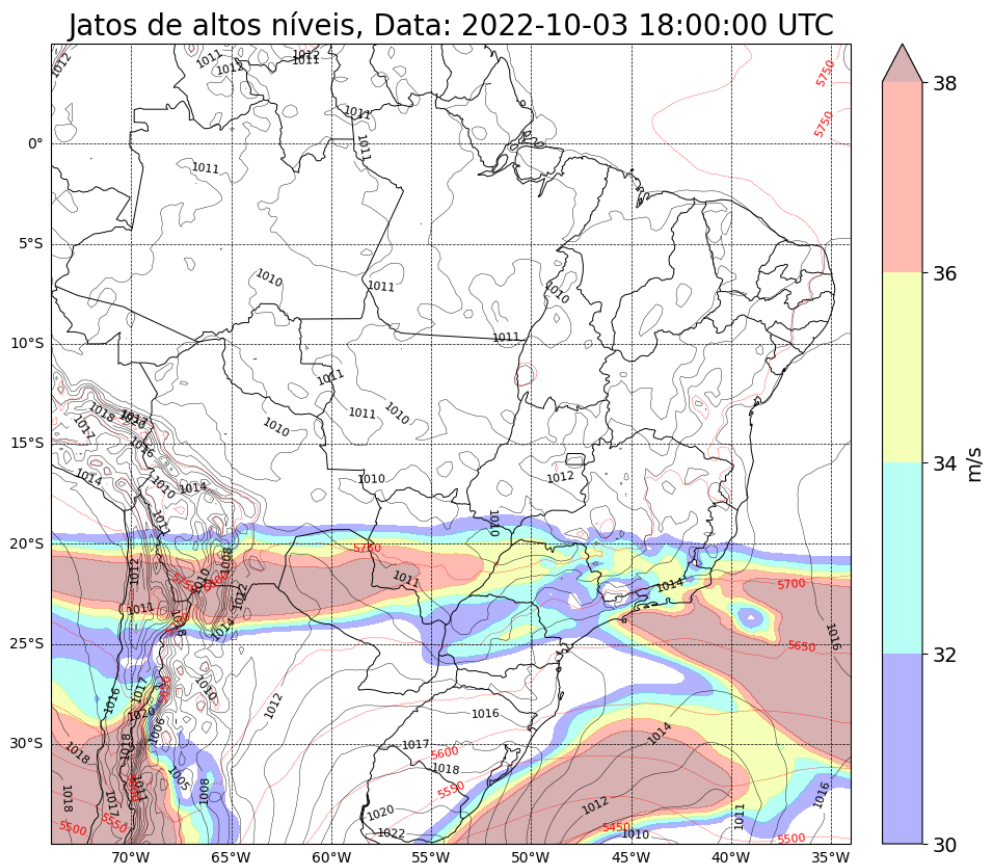
Figura 11 - Cartas sinóticas de pressão ao nível do mar da Marinha do Brasil para o dia 03 de outubro de 2022 às (a) 00:00 UTC e (b) 12:00 UTC.



Fonte: Adaptado da Marinha do Brasil (2022).

A configuração atmosférica em altos níveis como demonstrado na Figura 12, evidenciou a presença do jato subtropical com núcleo de velocidade superior a 34 m/s, posicionado sobre a região Sudeste do Brasil. Os jatos subtropicais desempenham um papel fundamental ao intensificar a divergência em altos níveis, condição essencial para a sustentação das correntes ascendentes, associadas à convecção (Wallace; Hobbs, 2006).

Figura 12 - Jatos de altos níveis (preenchidos), pressão (linhas pretas) e espessura (linhas vermelhas) sobre a América do Sul no dia 03 de outubro de 2022 às 18:00 UTC.



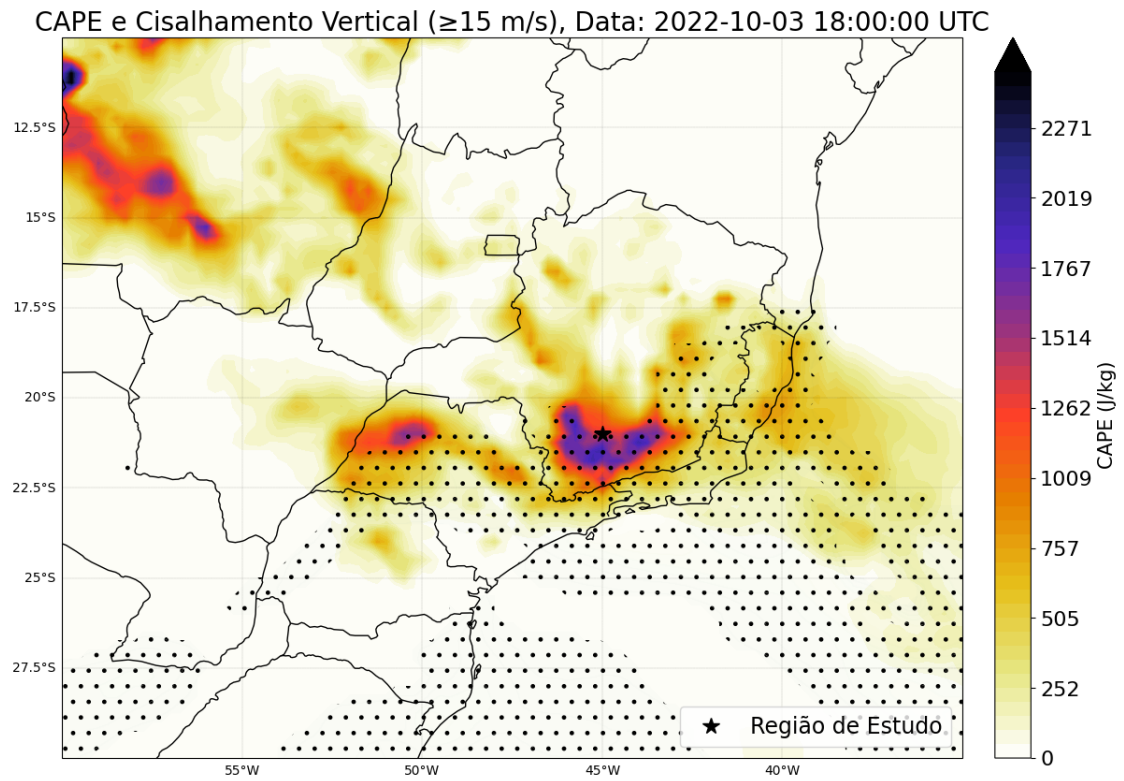
A análise termodinâmica do evento indicou valores de CAPE superiores a 1767 J/kg conforme demonstrado na Figura 13, sugerindo a presença de um ambiente altamente instável e propício à formação de tempestades severas. Outro fator meteorológico decisivo foi o cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa, com magnitudes iguais ou superiores a 15 m/s. Esses parâmetros contribuíram para a organização e longevidade da célula convectiva, ao separar espacialmente as correntes ascendentes e descendentes, favoreceu assim a estruturação de tempestades severas, frequentemente associadas à ocorrência de granizo (Brooks; Lee; Craven, 2003; Weisman; Klemp, 1986).

Assim, a combinação entre CAPE elevado, 1767 J/kg, forte cisalhamento vertical, superior a 15 m/s, e a atuação do jato em altos níveis configurou um ambiente para a formação de eventos convectivos severos.

A análise da sobreposição espacial entre os parâmetros atmosféricos e o registro de impacto valida o diagnóstico de tempo severo. É possível observar uma coincidência geográfica acentuada (Figura 9) entre a área de maior instabilidade termodinâmica (CAPE) e a área onde

o cisalhamento vertical do vento foi significativo, e a distribuição dos municípios afetados pelo granizo.

Figura 13 - Distribuição espacial da CAPE e das áreas com cisalhamento vertical do vento maior ou igual a 15 m/s na região sudeste do Brasil no dia 3 de outubro de 2022.



4. CONCLUSÃO

A análise da ocorrência de granizo em Minas Gerais permitiu identificar um padrão espacial e temporal, governado pela interação de fatores locais, como relevo e clima regional e de grande escala, como ENOS, cavados invertidos, JBN e ZCAS.

Os resultados evidenciam que o fenômeno não se distribui aleatoriamente pelo território, concentrando-se predominantemente nas mesorregiões Sul e Sudoeste com 563 registros. Essa distribuição reflete o papel determinante da topografia acidentada dessas áreas, que, aliada à dinâmica atmosférica regional, potencializa os mecanismos de levantamento do ar e a intensificação das tempestades.

Sazonalmente, o período crítico para a ocorrência de granizo em Minas Gerais compreende os meses de outubro a janeiro, com 1216 registros. Durante esta época, a combinação de temperaturas elevadas, alta umidade e intensa convecção fornece as condições necessárias para a formação de tempestades severas.

A análise da série temporal de agosto de 2018 a junho 2023 revelou um aumento no número de registros ocorrências de granizo, especialmente entre o período de 2018 e 2022. Este crescimento nos registros pode estar relacionado a evolução do sistema PRETS e à variabilidade climática natural.

Por fim, o evento registrado em 3 de outubro de 2022 foi resultado de um alinhamento atmosférico preciso, como a interação entre a presença de um cavado invertido e o jato subtropical em altos níveis, onde criou um ambiente de forte cisalhamento vertical, maior que 15m/s, e uma CAPE de 1767 J/kg. Esses fatores criaram um ambiente altamente propício à formação de granizo, evidenciando a relevância de compreender a interação multiescalar na gênese e evolução dessa tempestade de granizo no estado de Minas Gerais.

Em suma, este trabalho reforça que a previsão e o diagnóstico de tempestades de granizo dependem da compreensão integrada da geografia local e dos fatores meteorológicos como a instabilidade e a dinâmica atmosférica. Esses conhecimentos são essenciais para apoiar ações da Defesa Civil e reduzir os impactos socioeconômicos em um estado altamente vulnerável a eventos extremos.

Para estudos futuros, recomenda-se o aprofundamento das análises integrando dados de radar meteorológico, sensores orbitais e redes automáticas de estações de superfície, de modo a aprimorar a identificação e caracterização das tempestades produtoras de granizo. A incorporação de séries temporais mais longas e o cruzamento com dados de impactos socioeconômicos também poderiam contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais

eficazes de previsão e mitigação de desastres relacionados a eventos de granizo em Minas Gerais. Sugere-se, adicionalmente, a incorporação da climatologia de descargas elétricas (raios), que são observações cruciais do ponto de vista da mesoescala para o monitoramento da convecção profunda.

5. REFERÊNCIAS

ABRAFRUTAS. Granizo de novembro causa prejuízos irreparáveis na fruticultura regional. **Abrafrutas**, 28 nov. 2023. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2023/11/granizo-de-novembro-causa-prejuizos-irreparaveis-na-fruticultura-regional/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES GONÇALVES, J. L., AND SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* 22, 711–728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507> Acesso em: 12 setembro. 2025.

ALLEN, J. T.; GRIESER, J.; KUNZ, M.; *et al.* Understanding hail in the Earth system. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, 2020. Art. e2019RG000665. DOI: 10.1029/2019RG000665. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019RG000665>. Acesso em: 12 setembro. 2025.

ALLEN, J. T. A review of severe thunderstorms in Australia. **Atmospheric Research**, v. 178–179, p. 347–366, 2018. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.011>. Acesso em: 12 março 2025

ASSIS, Wellington Lopes; ABREU, Magda Luzimar de. O clima urbano de Belo Horizonte: análise têmporo-espacial do campo térmico e higrício. **Revista de Ciências Humanas**, v. 10, n. 1, p. 47-63, 2010. Disponível em: <https://www.ufmg.br/estacaoecologica/wp-content/uploads/2020/11/2010-ASSIS-Wellington-Lopes.-ABREU-Magda-Luzimar-de-clima-urbano.pdf> .

BARROS, Hugo Rogério; LOMBARDO, Magda Adelaide. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 1, p. 160-177, 2016. DOI: 10.11606/issn.2179 0892.geousp.2016.97783. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.21790892.geousp.2016.97783>. Acesso em: 11 novembro 2025.

BARROS, Juliana Ramalho; DA SILVA BALERO, Juan Carlos. A influência do clima e do tempo do Centro-Oeste do Brasil nas condições de voo na região. **Élisée-Revista de Geografia da UEG**, v. 1, n. 02, p. 25-50, 2012. Disponível em: <https://revista.ueg.br/index.php/elisee/article/view/1283>. Acesso em: 11 nov. 2025.

BROOKS, Harold E.; LEE, James W.; CRAVEN, Jeffrey P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. **Atmospheric Research**, v. 67, p. 73-94, 2003. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0) . Acesso em: 11 junho 2025.

CEMIG. Relatório de Situação de Emergência - ISE 29/11/17. [S.l.]: Cemig, 2017. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/ise-29-11-17-chuva-granizo.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CHANGNON, S. A.; CHANGNON, D.; HILBERG, S. D. Hailstorms across the nation: an atlas about hail and its damages. **Urbana: Illinois State Water Survey**, 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2142/15156>.

DESSENS, J. Severe convective weather in the context of nighttime global warming. **Geophysical Research Letters**, v. 22, p. 1241-1244, 1995. DOI: 10.1029/95GL00952. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/95GL00952>. Acesso em: 12 nov. 2025.

EMATER–MG. Relatório de Administração 2023. Belo Horizonte: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais, 2024. Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br/doc/REL_ATIVIDADE/relatorio_de_administracao_2023.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

FERREIRA, Angelica Tavares. Análise dinâmica, termodinâmica e microfísica de uma linha de instabilidade com o radar meteorológico móvel MXPOL. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-24072010-191632/publico/AngelicaFerreira.pdf> . Acesso em: 04 novembro 2025.

GHASEMIFARD, Homa et al. Do changing circulation types raise the frequency of summertime thunderstorms and large hail in Europe?. *Environmental Research: Climate*, v. 3, n. 1, p. 015008, 2024. DOI: 10.1088/2752-5295/ad22ec.

G1 Sul de Minas. Forte chuva de granizo encobre ruas e parte da Fernão Dias em São Gonçalo do Sapucaí (MG). G1, 03 out. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2022/10/03/forte-chuva-de-granizo-encobre-ruas-e-parte-da-fernao-dias-em-sao-goncalo-do-sapucaai-mg.ghtml>.

GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Disponível em: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em: 15 nov. 2025.

GUO, Xueliang; HUANG, Meiyuan. Hail formation and growth in a 3D cloud model with hail-bin microphysics. *Atmospheric Research*, v. 63, n. 1-2, p. 59-99, 2002. Disponível em: <https://revista.ueg.br/index.php/elisee/article/view/1283>. DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00019-4. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(02\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00019-4), Acesso em: 11 abril. 2025.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>. Acesso em: 30 março. 2025

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 04 março. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Minas Gerais – Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg.html>. Acesso em: 04 março. 2025.

JARDIM, Carlos Henrique; DE MOURA, Felipe Pereira. Variações dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais-Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/76048>. Acesso em: 04 novembro 2025.

KLEMP, J. B. Dynamics of Tornadic Thunderstorms. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 19, p. 369-402, 1987. Disponível em: https://www.atmosp.physics.utoronto.ca/~dbj/PHY459/papers/klemp_1987.pdf. Acesso em: 13 março. 2025.

KNIGHT, Charles A.; KNIGHT, Nancy C. Hailstone Embryos. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 27, p. 659-666, 1970. DOI: 10.1175/1520-0469(1970)027%3C0659:HE%3E2.0.CO;2. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1970\)027%3C0659:HE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1970)027%3C0659:HE%3E2.0.CO;2). Acesso em: 12 setembro. 2025.

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 61, n. 11, p. 1374–1387, 1980. DOI: 10.1175/1520-0477(1980)061<1374:MCC>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/61/11/1520-0477_1980_061_1374_mcc_2_0_co_2.xml. Acesso em: 22 março. 2025.

MINAS GERAIS. Coordenadoria Estadual de Defesa Civil. Defesa Civil Estadual presta apoio a município atingido por chuva de granizo. MG.GOV.BR, 9 mai. 2023. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/defesacivil/noticias/defesa-civil-estadual-presta-apoio-municipio-atingido-por-chuva-de-granizo>. Acesso em: 13 nov. 2025.

MARENGO, JOSÉ ANTONIO. Mudanças Climáticas Globais E Regionais: Avaliação Do Clima atual Do Brasil E Projeções De Cenários Climáticos Do Ti. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 01-18, 2001. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/05.25.18.19/doc/Marengo_mudancas%20climaticas%20globais%20e%20regionais.pdf. Acesso em: 22 junho. 2025.

MARINHA DO BRASIL. **Cartas Sinóticas**. Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). [S.l.]: [s.n.], 2025. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>

MARKOWSKI, Paul; RICHARDSON, Yvette. **Mesoscale meteorology in midlatitudes**. John Wiley & Sons, 2010. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=MDeYosfLLEYC&oi=fnd&pg=PP16&dq=MARKOWSKI,+P.%3B+RICHARDSON,+Y.+Mesoscale+meteorology+in+midlatitudes.+Chichester:+Wiley-Blackwell,+2010.&ots=feNwuD1rsR&sig=v7k0EGjnc5fKKsKa4rUlsL-SS0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 27 junho. 2025.

MARTINS, J. A. *et al.* A Climatology of Destructive Hailstorms in Brazil. **Atmospheric Research**, v. 184, p. 126-138, 2017. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.10.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.012>. Acesso em: 11 novembro. 2025.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira**

de Meteorologia, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005. Disponível em : https://legado.moodle.ufsc.br/pluginfile.php/3990070/mod_resource/content/1/PREVIS%C3%83O%20DE%20TEMPESTADES%20SEVERAS%20UTILIZANDO-SE%20PAR%C3%82METROS%20CONVECTIVOS%20E%20MODELOS%20DE%20MESOESCALA%20UMA%20ESTRAT%C3%89GIA%20OPERACIONAL%20ADOT%C3%81VEL%20NO%20BRASIL.pdf. Acesso em: 27 julho. 2025

NOGUEIRA, N. C. O.; MACHADO, P. H. G.; REBOITA, M. S. Estudo Climatológico das Frentes Frias atuantes no Sul do Rio Grande do Sul e no Sul de Minas Gerais entre 2009 e 2021. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 34, n. 20, p. 306–334, 2024. DOI: 10.55761/abclima.v34i20.16664. Disponível em: <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.16664>. Acesso em: 01 nov. 2025

PEREIRA, R. G. *et al.* Analysis of a hailstorm in the south of Minas Gerais state on October 13, 2020. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 136, n. 21, 2024. DOI: 10.1007/s00703-024-01020-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-024-01020-4>. Acesso em: 13 novembro 2025

PRETS. **PLATAFORMA DE REGISTROS DE TEMPO SEVERO**. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2024. Disponível em: <http://prevots.org/prets/>.

PUNGE, H. J.; KUNZ, M. Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: a review. **Atmospheric Research**, v. 176–177, p. 159–184, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.02.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>. Acesso em: 11 março 2025.

REBOITA, M. S. et al. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206-226, jul./dez. 2015. DOI: 10.5380/abclima.v17i0.41493 Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>. Acesso em: 13 novembro 2025

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPPER, S. Mesoscale convective systems over southeastern South America. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1290–1308, 2007. DOI: 10.1175/MWR3305.1 Disponível em <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1>, Acesso em: 15 fevereiro 2025.

SILVA, B. A.; REBOITA, M. S. ; CAPUCIN, B. C. ; MATTOS, E. V. ; COSTA, L. H. ; ENORE, D. P. ; BISCARO, T. S. . Characteristics of a hailstorm that occurred in Santa Rita do Sapucaí-MG, Brazil, in October 2019. **CIÊNCIA E NATURA**, v. 44, p. 1-16, 2022. DOI: /10.5902/2179460X65529. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X65529>. Acesso em: 20 setembro 2025.

TRAPP, Robert J. et al. Changes in severe thunderstorm environment frequency during the 21st century caused by anthropogenically enhanced global radiative forcing. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 50, p. 19719-19723, 2007. DOI: 10.1073/pnas.0705494104. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0705494104>. Acesso em: 11 março 2025

VELASCO, Ines; FRITSCH, J. Michael. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, n. D8, p. 9591-9613,

1987. DOI: 10.1029/JD092iD08p09591. Disponível em:
<https://doi.org/10.1029/JD092iD08p09591>.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=HZ2wNtDOU0oC&oi=fnd&pg=PR1&dq=WALLACE,+J.+M.%3B+HOBBS,+P.+V.+Atmospheric+science:+an+introductory+survey.+Elsevier,+2006.&ots=C6QDqis4S3&sig=8J7N0xFY8lBxkkWSXRz5srM4JME&redir_esc=y#v=onepage&q=WALLACE%2C%20J.%20M.%3B%20HOBBS%2C%20P.%20V.%20Atmospheric%20science%3A%20an%20introductory%20survey.%20Elsevier%2C%202006.&f=false.

WEISMAN, Morris L.; KLEMP, Joseph B. Characteristics of isolated convective storms. In: **Mesoscale meteorology and forecasting**. Boston, MA: American Meteorological Society, 1986. p. 331-358. DOI: 10.1007/978-1-935704-20-1_15. Disponível em:
https://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1_15.