



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/04.19.12.02-TDI

**CLIMATOLOGIA DE ONDAS DE CALOR E DE FRIO  
NO BRASIL E RELAÇÕES COM AS FASES DO EL  
NIÑO OSCILAÇÃO SUL**

Tiago Bentes Mandú

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pela Dra.  
Mary Toshie Kayano, aprovada em  
25 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46NFL5E>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/04.19.12.02-TDI

## CLIMATOLOGIA DE ONDAS DE CALOR E DE FRIO NO BRASIL E RELAÇÕES COM AS FASES DO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL

Tiago Bentes Mandú

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pela Dra.  
Mary Toshie Kayano, aprovada em  
25 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46NFL5E>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Mandú, Tiago Bentes.

M312c Climatologia de ondas de calor e de frio no Brasil e relações com as fases do El Niño Oscilação Sul / Tiago Bentes Mandú. – São José dos Campos : INPE, 2022.

xxviii + 113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/04.19.12.02-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientadora : Dra. Mary Toshie Kayano.

1. Climatologia. 2. Oscilação Sul. 3. Distribuição de temperatura. I.Título.

CDU 551.58(81)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS****DEFESA FINAL DE MESTRADO TIAGO BENTES MANDÚ  
BANCA Nº 078/2022 , REG. 287219/2020.**

No dia 25 de março de 2022, as 10h00, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi **APROVADO(A)** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Novo Título:** “Climatologia de ondas de calor e de frio no Brasil e relações com as fases do El Niño-Oscilação sul.”

**Membros da Banca:**

Dr. Julio Pablo Reyes Fernandez – Presidente – INPE / DIMNT

Dra. Mary Toshie Kayano- Orientadora INPE / DIMNT

Dra. Rita Valeria Andreoli de Souza - Membro externo – UEA/Universidade do Estado do Amazonas

Dra. Iracema Fonseca De Albuquerque Cavalcanti - Membro Interno – CPTEC-INPE



Documento assinado eletronicamente por **Julio Pablo Reyes Fernandez, Tecnologista**, em 30/03/2022, às 10:56 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mary Toshie Kayano, Pesquisadora**, em 30/03/2022, às 11:01 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rita Valeria andreoli de souza (E), Usuário Externo**, em 30/03/2022, às 13:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iracema Fonseca de albuquerque cavalcanti (E)**, **Usuário Externo**, em 30/03/2022, às 13:49 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9623586** e o código CRC **45457516**.

---

Referência: Processo nº 01340.002295/2022-84

SEI nº 9623586

*"A persistência é o menor caminho do êxito."*

CHARLES CHAPLIN



*Dedico este trabalho a minha mãe **Tânia Mara Bentes**, minha sobrinha **Laura Bentes Pimentel** e minha afilhada **Ana Vitória**.*



## AGRADECIMENTOS

A minha mãe Tânia Mara Bentes por sempre acreditar nos meus sonhos e me apoiar em cada passo por me dá todo o apoio e carinho necessário para que eu pudesse cumprir mais essa etapa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

A minha orientadora professora Mary Toshie Kayano por todo o apoio que me foi dado, por todas as contribuições e por todo carinho que teve por mim durante a construção desta dissertação, por sempre ser presente e estar disposta a ajudar em todos os momentos, muito obrigado.

A professora Ana Carla Gomes do curso de Ciências Atmosféricas da UFOPA que me orientou durante a graduação e me incentivou a ingressar na pesquisa, por ser uma amiga, sempre me aconselhar e por tanto me ajudar no início do meu mestrado, nunca vou esquecer o que a senhora fez por mim, muito obrigado.

Aos meus amigos de longa data, Diego Menezes, Naila Ruana, Ana Samela, Mel Santos, Vivianne Alfaia, Samuel Silva, Marcos Colares, Eduardo Almeida e Polyane Santos por todo o apoio e carinho que sempre tiveram por mim e por todo o apoio que me foi dado.

Aos amigos que conquistei durante o mestrado, Lorena Martina, Giovana Galetti, Nicole Laureanti, João Barros, Sara Egli, Eliseu Afonso, Laurizio Alves, Livia Gava, Caio Atila, Ana Nascimento e Gilvani Gomes, muito obrigado.



## RESUMO

Eventos extremos de temperatura causam efeitos adversos em inúmeros segmentos da sociedade, como por exemplo na saúde e bem estar do ser humano, agricultura, pecuária, demanda hídrica e de energia elétrica. Os episódios de ondas de calor (OC) (ondas de frio-OF) são extremos prolongados de temperatura, definidos como períodos de dias consecutivos de calor (frio) exacerbado. O objetivo do trabalho foi avaliar as principais características climatológicas das OC e OF no Brasil e avaliar suas relações com o El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Foram utilizados dados diários de temperatura máxima, média e mínima do ar provenientes de estações meteorológicas convencionais para o período de 1961 a 2019, que foram submetidos a consistência destes registros a fim de remover dados espúrios. Regiões homogêneas foram identificadas através da análise de agrupamento da temperatura compensada do ar. As séries temporais de temperatura máxima e mínima do ar das regiões foram utilizadas na identificação dos episódios de OC e OF, respectivamente. As fases do ENOS foram identificadas trimestralmente usando o Oceanic Niño Index. As análises foram realizadas a partir de estatísticas descritivas, testes de hipóteses e transformadas em ondeletas. A regionalização de 4 grupos foi adequada, pois concorda com as características térmicas, climatológicas e topográficas de cada área. Os eventos de OC e OF apresentaram maior ocorrência na porção centro-sul do país, com alta variabilidade interanual em todos os grupos. Tendências positivas estatisticamente significativas foram notadas para as OC na região tropical do país e negativas para as OF em todo o Brasil. A análise de ondeletas indicou a escala de tempo dominante de 4 anos para os dois extremos, com aumento de eventos de OC durante a fase quente do ENOS na região tropical e diminuição na porção subtropical, sendo notado o inverso para as OF. Espera-se que esses resultados possam colaborar para o melhor entendimento destes extremos de temperatura no país.

Palavras-chave: Climatologia. Oscilação Sul. Distribuição de temperatura.



# CLIMATOLOGY OF HEAT AND COLD WAVES IN BRAZIL AND RELATIONS WITH EL NIÑO SOUTHERN OSCILLATION PHASES

## ABSTRACT

Extreme temperature events cause adverse effects on numerous segments of society, such as human health and well-being, agriculture, livestock, water demand and electricity. Episodes of HeatWaves (HW) (Cold Waves-CW) are prolonged extremes of temperature, defined as periods of consecutive days of exacerbated (heat) cold. The objective of this work was to evaluate the main climatological characteristics of the HW and CW in Brazil and to evaluate their relationship with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Daily maximum, average and minimum air temperature data from conventional weather stations for the period from 1961 to 2019 were used, which were submitted to consistency of these records in order to remove spurious data. Homogeneous regions were identified through air temperature using cluster analysis. The time series of maximum and minimum mean air temperature of the regions were used to identify the episodes of HW and CW, respectively. The ENSO phases were identified quarterly using the Oceanic Niño Index. The analyzes were performed using descriptive statistics, hypothesis tests and wavelet transform. The regionalization of 4 groups was adequate, as it agrees with the thermal, climatological and topographical characteristics of each area. HW and CW events were more frequent in the south-central portion of the country, with high interannual variability in all groups. Statistically significant positive trends were noted for HW in the tropical region of the country and negative trends for CW throughout Brazil. Wavelet analysis indicated the dominant time scale of 4 years for both extremes, with an increase in HW events during the hot ENSO phase in the tropical region and a decrease in the subtropical portion, with the inverse being noted for the CW. It is hoped that these results can contribute to a better understanding of these temperature extremes in the country.

Keywords: Climatology. Southern Oscillation. Temperature distribution.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Porcentagem dos tipos de definições utilizadas na identificação das OCs em uma amostra de 109 estudos publicados entre 2007 e 2018. . . . .	8
2.2 Mapas globais das estatísticas de calor cumulativo. <b>a)</b> o maior calor acumulado sazonal; <b>b)</b> ano em que esse valor ocorre; <b>c)</b> porcentagem da tendência decenal na mudança do calor acumulado <b>d)</b> Porcentagem da tendência decenal no número de dias em OCs; <b>e)</b> anomalia média de um dia de onda de calor, <b>f)</b> respectiva tendência decenal. . . . .	11
2.3 Padrões oceânicos sob condições de a) El Niño, b) Neutralidade, c) La Niña no Oceano Pacífico Tropical. . . . .	16
2.4 Esquemas das condições do oceano e circulação na ocorrência de a) El Niño, b)El Niño Modoki, c)La Niña, d)La Niña Modoki. . . . .	17
2.5 Série temporal para o período de 1979 a 2020 do MEI.v2, os valores em vermelho (azul) indicam a presença da fase quente (fria) do ENOS, enquanto as barras em cinza são condições de neutralidade. . . . .	18
2.6 Série temporal da média móvel trimestral do IOS para o período de 1951 a 2020, as barras vermelhas (azuis) são os valores negativos (positivos). . . . .	19
2.7 Série temporal para o período de 1950 a 2020 do ONI, os valores em vermelho (azul) indicam a presença da fase quente (fria) do ENOS, enquanto as barras em cinza são condições de neutralidade. . . . .	20
2.8 Evolução de evento típico de EN e seus impactos na AS. TSM (esquerda), precipitação (centro) e temperatura do ar (direita) para os a) valores climatológicos; anomalias trimestrais para b) JJA; c) SON; d) DJF; e) MAM. 0 em parênteses indica um EN em desenvolvimento (ano 0) e 1 o ano subsequente em decaimento do EN. . . . .	22
2.9 Esquema dos diversos processos físicos que contribuem para OCs, as interações e feedbacks existentes entre eles, e escalas de tempo. . . . .	24
3.1 Localização geográfica da área de estudo, incluindo o relevo. . . . .	25
3.2 Estações meteorológicas utilizadas na análise de agrupamento. . . . .	27
3.3 Estrutura básica do <i>boxplot</i> . . . . .	33
4.1 a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de <i>Silhouette</i> para os 2 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) <i>Boxplots</i> dos grupos. Em vermelho é indicado o grupo 1 e o grupo 2 é representado pela cor verde. . . . .	40

4.2	a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de <i>Silhouette</i> para os 3 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) <i>Boxplots</i> dos grupos. Em vermelho é indicado o grupo 1, o grupo 2 é representado pela cor verde e o grupo 3 pela cor laranja. . . . .	42
4.3	a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de <i>Silhouette</i> para os 4 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) <i>Boxplots</i> dos grupos. Em vermelho é representado o grupo 1, em verde o grupo 2, em laranja o grupo 3 e em azul o grupo 4. . . . .	44
4.4	a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de <i>Silhouette</i> para os 54 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) <i>Boxplots</i> dos grupos. Em vermelho é representado o grupo 1, em verde o grupo 2, em laranja o grupo 3, em azul o grupo 4 e em marrom o grupo 5. . . . .	45
4.5	Ocorrência anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	48
4.6	Frequência anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	49
4.7	Histograma da duração dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	50
4.8	Duração média anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	51
4.9	Duração máxima anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	52
4.10	Intensidade média anual dos eventos de OC para os grupos. . . . .	53
4.11	Intensidade máxima anual dos eventos de OC para os grupos. . . . .	54
4.12	Ocorrência anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	56
4.13	Frequência anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	57
4.14	Histograma da duração dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	58
4.15	Duração média anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	59
4.16	Duração máxima anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4. . . . .	60
4.17	Intensidade média anual dos eventos de OF para os grupos. . . . .	61
4.18	Intensidade máxima anual dos eventos de OF para os grupos. . . . .	62

4.19	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	64
4.20	a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	65
4.21	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 2. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	67
4.22	a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	68
4.23	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	70

4.24	a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	71
4.25	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 4. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	73
4.26	a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 4. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	74
4.27	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	76
4.28	a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	77

4.29	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 2. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	79
4.30	A) e C) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 2. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; B) e D) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	80
4.31	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	82
4.32	a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	83
4.33	a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	85

4.34 a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 4. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%. . . . .	86
A.1 Porcentagem dos dias de temperatura mínima do ar removidos pela análise de consistência. . . . .	111
A.2 Porcentagem dos dias de temperatura média do ar removidos pela análise de consistência. . . . .	112
A.3 Porcentagem dos dias de temperatura máxima do ar removidos pela análise de consistência. . . . .	113

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Características das OCs avaliadas no presente estudo. . . . .	30
3.2 Características das OF avaliadas no presente estudo. . . . .	31
3.3 Fases do ENOS para cada trimestre durante o período de 1961-2019. . .	32
4.1 Características das OF avaliadas no presente estudo. . . . .	47
4.2 Testes de tendências aplicados nas características das OC para cada grupo analisado. Somente valores estatisticamente significativos ao nível de 5% são mostrados. . . . .	55
4.3 Características dos eventos de OF nos 4 grupos no período de 1961-2019.	55
4.4 Testes de tendências aplicados nas características das OF para cada grupo. Somente valores estatisticamente significativos ao nível de 5% são mostrados. Características dos eventos de OF nos 4 grupos no período de 1961-2019. . . . .	63
4.5 Características trimestrais das ondas de calor do grupo 1 para as fases do ENOS. . . . .	66
4.6 Características trimestrais das ondas de calor do grupo 2 para as fases do ENOS. . . . .	69
4.7 Características trimestrais das ondas de calor do grupo 3 para as fases do ENOS. . . . .	72
4.8 Características trimestrais das OC do grupo 4 para as fases do ENOS. .	75
4.9 Características trimestrais das ondas de frio do grupo 1 para as fases do ENOS. . . . .	78
4.10 Características trimestrais das ondas de frio do grupo 2 para as fases do ENOS. . . . .	81
4.11 Características trimestrais das ondas de frio do grupo 3 para as fases do ENOS. . . . .	84
4.12 Características trimestrais das OFs do grupo 4 para as fases do ENOS. .	87



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	– América do Sul
AA	– Análise de Agrupamento
BDMEP	– Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
EN	– El Niño
ENOS	– El Niño Oscilação Sul
ENSO	– <i>El Niño Southern Oscillation</i>
ESALQ	– Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz
GDE	– Graus-Dias de Excedência
HWDI	– <i>Heat Wave Duration Index</i>
IAC	– Instituto Agrônomo de Campinas
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
IOS	– Índice Oscilação Sul
JRA-55	– <i>Japanese 55-year Reanalysis</i>
LN	– La Niña
MK	– Mann-Kendall
MEI	– <i>Multivariate ENSO Index</i>
NOAA	– <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONI	– <i>Oceanic Niño Index</i>
OC	– Onda de Calor
OCs	– Ondas de Calor
OF	– Onda de Frio
OFs	– Ondas de Frio
OS	– Oscilação Sul
OMA	– Oscilação Multidecadal do Atlântico
ODP	– Oscilação Decadal do Pacífico
OMM	– Organização Meteorológica Mundial
PNM	– Pressão ao Nível do Mar
ROL	– Radiação de Onda Longa
TP	– Teste de Pettitt
Se	– Teste de estimador de tendência de Sen
TO	– Transformada em Ondeletas
TSM	– Temperatura da Superfície do Mar
TT-DEWCE	– <i>Task Team on Definitions of Extreme Weather and Climate Events</i>
USP	– Universidade de São Paulo
VCAN	– Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	– Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	– Zona de Convergência Intertropical



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_d$	–	Conjunto de Dados
*	–	Complexo Conjugado
$x$	–	Conjunto de Dados
$D_s$	–	Desvio Máximo Entre Duas Funções de Distribuições Acumuladas $F_n$ e $F_m$
$\sigma$	–	Desvio Padrão
$d$	–	Dia
$d_{xy}$	–	Distância Euclidiana
$U_{(t,N)}$	–	Estatística U de Mann-Whitney
$\omega_0$	–	Frequência Adimensional Considerada
$H_1$	–	Hipótese Alternativa
$H_0$	–	Hipótese Nula
Int	–	Intensidade das ondas de calor
$\bar{s}(k)$	–	Largura média da Silhueta de um Grupo
$\bar{x}$	–	Média Aritmética
$Q_{med}$	–	Mediana da Inclinação Caso n seja um número ímpar/par
P	–	Nível de Significância
n	–	Número de Elementos
$\psi_t$	–	Ondeleta Mãe
$\eta$	–	Parâmetro de Tempo Admissional
$P_{10}$	–	Percentil 10
$T_{limiar}$	–	Percentil 90 da temperatura Máxima do Ar
$t_j$	–	Representa a Quantidade de Repetições de uma Extensão j
$X_n$	–	Sequência Discreta
$\alpha$	–	Significância Estatística
sgn	–	Sinais da Diferença
$Z_{mk}$	–	Transformada Z do Teste de Mann-Kendall
$T_{y,i}$	–	Temperatura Máxima/Mínima do Ar Diária do dia i no ano y
$T_{max}$	–	Temperatura Máxima do Ar
$T_{min}$	–	Temperatura Mínima do ar diária
$Q_t$	–	Teste Se para n Pares
$\cup$	–	União de Conjuntos
varS	–	Variância da estatística S
S	–	Variável Estatística
$K_N$	–	Valor Crítico
$x_{i+1}$	–	Valores no Futuro
$x_i$	–	Valor na Posição i no Conjunto de Dados



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	4
1.1.1 Objetivos específicos . . . . .	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Ondas de calor . . . . .	5
2.2 Ondas de frio . . . . .	11
2.3 El Niño Oscilação Sul . . . . .	15
<b>3 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>25</b>
3.1 Área de estudo e dados . . . . .	25
3.2 Controle de qualidade dos dados . . . . .	26
3.3 Análise de agrupamento . . . . .	26
3.4 Identificação e caracterização dos eventos de ondas de calor . . . . .	29
3.5 Identificação e características dos eventos de ondas de frio . . . . .	30
3.6 Definição das fases do El Niño Oscilação Sul . . . . .	31
3.7 Estatística descritiva . . . . .	32
3.8 Testes de tendência temporal . . . . .	34
3.8.1 Teste de Mann-Kendall . . . . .	34
3.8.2 Teste de Pettitt . . . . .	35
3.8.3 Teste de estimador de tendência de Sen . . . . .	36
3.9 Transformada em ondeletas . . . . .	36
3.10 Relação entre fases do ENOS e eventos extremos de temperatura . . . . .	37
3.10.1 Comparativo entre as fases do ENOS . . . . .	37
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>39</b>
4.1 Regionalização da temperatura compensada do ar . . . . .	39
4.2 Caracterização espaço-temporal . . . . .	46
4.2.1 Ondas de calor . . . . .	46
4.2.2 Ondas de frio . . . . .	55
4.3 Associação com o El Niño Oscilação Sul . . . . .	63
4.3.1 Ondas de calor . . . . .	63
4.3.2 Ondas de frio . . . . .	75

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>89</b>
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	91
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A - CONSISTÊNCIA DOS DADOS.</b>	<b>111</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Eventos extremos são definidos como condições incomuns de tempo que causam impactos negativos em diversos segmentos da sociedade e em ecossistemas terrestres e marinhos, caracterizados pela probabilidade de ocorrência, intensidade, duração e extensão espacial (STEPHENSON et al., 2008). De acordo com Añel et al. (2017) esses eventos extremos causam danos expressivos em todas as atividades que dependem de padrões climáticos esperados e previsíveis, influenciando negativamente em todos os sistemas naturais.

Dos eventos extremos conhecidos, destacam-se os eventos extremos de temperatura, pois tanto as condições de frio extremo como de calor excessivo podem prejudicar ou beneficiar diversas atividades humanas, como: o consumo e distribuição de energia e água, agricultura, conforto térmico e economia (RUSTICUCCI; VARGAS, 2002). Segundo Mora et al. (2017), cerca de 30% da população mundial é exposta a condições de temperaturas elevadas, exposição essa que pode causar diversos efeitos adversos na saúde e no bem-estar do ser humano, ocasionando redução de produtividade intelectual, oscilações de humor, agravamento de enfermidades e em casos graves levar a óbito. De acordo com Rusticucci (2012), os principais aspectos temporais e espaciais destes extremos de temperatura na América do Sul (AS) ainda não foram completamente documentados na literatura científica, o que dificulta a tomada de decisão do poder público e o planejamento de medidas mitigadoras que visam reduzir os impactos desses eventos no continente.

Dentre os eventos extremos de temperatura, vale destacar as Ondas de Calor (OCs), que de acordo com D'Ippoliti et al. (2010) são definidas como um prolongado período de calor excessivo, que são relacionadas com mecanismos físicos não lineares. Os autores destacam que sua gênese não é ocasionada apenas por padrões de circulação de grande escala, mas também, pela baixa umidade do solo, supressão de precipitação, movimentos verticais descendentes, anomalias negativas de umidade do ar nos baixos níveis da atmosfera e efeitos de urbanização como as ilhas de calor urbano (FISCHER; SCHÄR, 2009; MURARI et al., 2016; GEIRINHAS et al., 2017; HERBEL et al., 2018; LIN et al., 2018, 2018; LUO; LAU, 2018).

No Brasil, Bitencourt et al. (2016) analisaram as características das OCs no Brasil a partir de 265 estações meteorológicas convencionais pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Eles dividiram o país em 3 regiões com base na disponibilidade de dados, e observaram que esses eventos ocorrem preferencialmente entre setembro e fevereiro com os maiores registros observados na fase fria da Os-

cilação Decadal do Pacífico (ODP). Geirinhas et al. (2017) analisaram os aspectos sinóticos associados as OCs em seis capitais brasileiras, e notaram que na região tropical, os episódios de OCs são associados ao deslocamento para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), enquanto que em médias latitudes, têm-se relações com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Diniz et al. (2020) analisaram o impacto das OCs na mortalidade em idosos na região metropolitana de São Paulo, e mostraram que as OCs causam um aumento significativo na taxa de mortalidade nessa faixa etária.

Diversos estudos indicam que as OCs estão se tornando cada vez mais frequentes, intensas e persistentes. Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020) notaram esses aumentos em todos os continentes, concordando com o observado por Smid et al. (2019) na Europa, e por Bitencourt et al. (2020) no Brasil. Aumento esse que pode intensificar os efeitos negativos das OCs na saúde e no bem-estar do ser humano nas próximas décadas (HERRING et al., 2014; TOMCZYK; BEDNORZ, 2016).

Destaca-se também, outro extremo de temperatura, as Ondas de Frio (OFs) que são caracterizadas por uma sequência de dias consecutivos de baixas temperaturas que impactam negativamente a agricultura e a saúde humana (REBOITA et al., 2015). De acordo com Li et al. (2018), diversas enfermidades, principalmente relacionadas ao sistema respiratório, estão diretamente associadas a episódios de OFs, uma vez que as baixas temperaturas podem aumentar a permanência em ambientes fechados que em sua maioria apresentam maior quantidade de vírus e bactérias que afetam as vias aéreas superiores e causam enfermidades no aparelho respiratório.

No Brasil, Lucyrio et al. (2019) identificaram episódios intensos de OFs no nordeste do estado de São Paulo e observaram que os eventos foram acompanhados de geadas nesta região que causaram prejuízos diretos na agricultura. Capucin et al. (2019) realizaram um estudo de caso de uma OF que atingiu a cidade de Bauru em junho de 2015, e notaram que este evento foi relacionado com a incursão de ar frio de origem polar, que permaneceu na região por cerca de 10 dias consecutivos devido a presença de um sistema de alta pressão pós frontal. Silveira et al. (2018) avaliaram a influência das OFs na ocorrência de doenças do aparelho cardiovascular na cidade de São Joaquim-SC e concluíram que 39% da morbidade por pneumonia pode ser explicada pelas condições de frio intenso causadas pelas OFs.

Diferente das OCs, as OFs apresentam tendências negativas que indicam que nas últimas décadas esses eventos apresentam menor frequência. Além disso, as projeções futuras indicam que até o final do século, em algumas regiões não serão mais obser-

vados episódios de OFs (SMID et al., 2019). Em concordância, Bitencourt et al. (2020) identificaram um decréscimo nos eventos de OFs em todas as regiões brasileiras no período de 1961-2016.

De acordo com Cerne e Vera (2011) a ocorrência e intensificação de eventos extremos de temperatura como as OCs e OFs são diretamente influenciadas por modos de variabilidade uma vez que causam alterações na circulação atmosférica de larga-escala e na Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Segundo Piticar et al. (2019) em escala regional, condições extremas de temperatura podem estar associadas com oscilações de escala multidecadal como a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), enquanto que em escala global, são observadas relações com modos de variabilidade interanual, como o El Niño Oscilação Sul (ENOS).

De acordo com Ashok e Yamagata (2009), o ENOS é um modo de variabilidade acoplado oceano atmosfera que ocorre normalmente entre 3 e 8 anos, causado por anomalias de TSM na região tropical do oceano Pacífico e possui duas fases, quente (El Niño - EN) e fria (La Niña - LN). O ENOS é um modo de variabilidade dominante na variabilidade climática interanual em escala global, que afeta não somente a região de atuação do fenômeno mas também regiões distantes como os trópicos, médias e altas latitudes, influência essa conhecida como teleconexões (BRÖNNIMANN, 2007).

Segundo Cai et al. (2020), o ENOS exerce importante influência no clima da AS, na precipitação, por exemplo, na fase quente para os quatro trimestres do ano são notadas anomalias negativas na porção equatorial do continente, enquanto que na costa do Peru e no Sudoeste da AS são observadas anomalias positivas. Já para a temperatura do ar, os autores comentam que no trimestre de junho, julho e agosto nota-se anomalias positivas na região subtropical do continente, enquanto que em todos os trimestres são notadas essas anomalias na porção Norte, anomalias negativas são observadas apenas no trimestre de setembro, outubro e novembro no extremo Sul do continente. O estudo de Kayano et al. (2017) avaliou os efeitos do ENOS na temperatura do ar em superfície na AS em escala sazonal. Eles observaram que esses efeitos ocorrem a partir de mecanismos termodinâmicos, como a advecção de temperatura e anomalias de precipitação, que causam desvios de temperatura em grande parte do continente.

Kenyon e Hegerl (2008) indicaram que eventos extremos de temperatura são diretamente influenciados pelo ENOS. Na Índia, Murari et al. (2016) apontaram que em condições de EN se tem o maior número de OCs e que os episódios são mais longos e intensos, relação essa que está associada com o deslocamento para leste da circula-

ção de Walker. Os resultados do estudo de [Ratnam et al. \(2016\)](#), também conduzido na Índia, indicam que ambas as fases do ENOS causam condições favoráveis para a formação e desenvolvimento das OFs. No Brasil, [Bitencourt et al. \(2016\)](#) mostraram indícios de que na porção Norte do país as OCs podem estar relacionadas com a fase quente do ENOS. Os resultados de [Firpo et al. \(2012\)](#) para o estado do Rio Grande do Sul, indicam que as OFs podem ser associadas com a fase fria do ENOS. Entretanto, um entendimento completo da relação entre o ENOS e os eventos de OCs e OFs no Brasil ainda necessita ser aprimorado, visto que os trabalhos consultados apresentam apenas avaliações para áreas específicas do país.

Diante da importância social, ambiental e econômica dos episódios de OC e OF no Brasil e também pelas indicações de que o ENOS influencia as ocorrências dos eventos extremos de temperatura, essa proposta de dissertação baseia-se na necessidade de melhor caracterizar esses eventos no Brasil, bem como considerar as influências do principal modo de variabilidade climática interanual. Portanto, a presente dissertação de mestrado busca definir as principais características temporais dos eventos OCs e OFs considerando regiões homogêneas no Brasil e como as fases do ENOS influenciam tais eventos de OCs e OFs.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo geral desta dissertação é identificar os aspectos climatológicos das características de OCs e OFs no Brasil e suas distribuições nas diferentes fases do ENOS.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- Realizar a consistência dos dados diários de temperatura do ar para as estações meteorológicas utilizadas;
- Definir regiões homogêneas de temperatura média do ar a partir da análise de agrupamento;
- Avaliar tendências temporais nas características dos eventos de OCs e OFs;
- Determinar períodos dominantes de variabilidade de índices que representam uma ou mais características das OCs e OFs a partir de análise em ondeletas;
- Encontrar as associações das características dos eventos de OCs e OFs com as fases do ENOS.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na primeira seção deste capítulo será apresentada uma visão geral das OCs, expondo os principais aspectos deste fenômeno, seus métodos de identificação, processos dinâmicos e termodinâmicos envolvidos na sua gênese e os principais impactos que esses episódios podem acarretar. A seção seguinte contém uma descrição sucinta dos eventos de OFs, apresentando suas características gerais, condições sinóticas associadas e impactos socioeconômicos. Na terceira e última seção será abordado o fenômeno ENOS e discutidos os aspectos relacionados à sua definição, métodos de identificação, impactos na AS e influência nos eventos de OCs e OFs.

### 2.1 Ondas de calor

Os episódios de OCs ainda não possuem definição universal na literatura científica, os critérios adotados variam principalmente quanto à duração mínima e aos limites de temperatura (PERKINS; ALEXANDER, 2013; TOMCZYK et al., 2017). A Organização Meteorológica Mundial (OMM) implementou em 2010 o *Task Team on Definitions of Extreme Weather and Climate Events* (TT-DEWCE), no relatório publicado em 2016, definiram as OCs como condições severas de tempo com calor acima do esperado em determinada região que persistem por no mínimo dois dias consecutivos durante a estação quente, baseando-se nos aspectos climatológicos locais (WMO, 2016).

Añel et al. (2017) ressaltaram que essa definição contempla as características meteorológicas regionais do fenômeno para definir um evento extremo, uma vez que um determinado registro de temperatura pode ser extremo em uma região ou dentro do esperado em outra. Entretanto, essa definição restringe a ocorrência dos eventos à estação quente, em conformidade com Ceccherini et al. (2016) que encontraram episódios de OCs, sobre a AS, ocorrendo geralmente em dezembro e janeiro. Contudo, Geirinhas et al. (2018) e Silveira et al. (2019) apontaram que no Brasil esses eventos podem ser observados em todos os meses do ano.

Outras definições podem ser encontradas na literatura científica, como a apresentada por D'Ippoliti et al. (2010), eles descrevem os eventos de OC como um período prolongado de calor excessivo. De acordo com Robinson (2001), as OCs são episódios onde por diversos dias a temperatura do ar em ambientes abertos é expressivamente superior à faixa esperada de temperatura ambiente. Segundo Xie et al. (2020), os eventos de OCs são períodos de dias consecutivos com elevadas temperaturas acima do esperado.

O relatório do TT-DEWCE aponta que os episódios de OCs possuem quatro principais características. A primeira se refere à magnitude que expressa a quantidade de eventos registrados e reflete o número de eventos identificados. A segunda é a duração que trata da persistência de cada episódio. A terceira característica é a severidade, que representa a relação entre a magnitude e duração. A quarta se refere à extensão espacial dos episódios, que informa a região geográfica afetada e o aspecto de abrangência das OCs (WMO, 2016).

Existem diversas métricas que podem ser adotadas na identificação dos episódios de OCs. Perkins e Alexander (2013) apontaram que os índices utilizados são majoritariamente baseados em limiares absolutos ou relativos à temperatura. Os índices com limiares absolutos, fundamentados em valores críticos de temperatura (ou de anomalias de temperatura), são de suma importância na avaliação dos impactos socioeconômicos e na tomada de decisão de centros meteorológicos (HORTON et al., 2016). Os índices baseados em limiares relativos utilizam percentis estatísticos, e assim levam em consideração fatores climatológicos locais o que permite comparar regiões com diferentes tipologias climáticas (ANDERSON; BELL, 2009).

A OMM, empregando o *Heat Wave Duration Index* (HWDI) proposto por Radinović e Čurić (2012), identifica os eventos de OCs quando em 5 dias consecutivos ou mais a temperatura máxima do ar excede em 5°C o valor climatológico de referência (1961-1990). Entretanto, Reis et al. (2019) mostraram que esse critério não é satisfatório na porção tropical do Brasil, uma vez que nessa região a amplitude térmica é baixa em razão da sua posição geográfica.

De acordo com o departamento meteorológico da Índia, um evento de OC ocorre quando uma das estações meteorológicas monitoradas registra temperatura  $\geq 40^{\circ}\text{C}$  enquanto nas estações adjacentes os registros de temperatura são próximos de  $30^{\circ}\text{C}$  (DASH; MAMGAIN, 2011). A métrica utilizada por Grotjahn e Faure (2008) na Califórnia, identifica o fenômeno quando por pelo menos 3 dias consecutivos a temperatura mínima do ar é superior à  $38^{\circ}\text{C}$  com pelo menos um desses dias apresentando temperatura máxima acima de  $40,5^{\circ}\text{C}$ . Outra abordagem com limiares absolutos é a adotada por Bitencourt et al. (2016) no Brasil, baseada em valores de desvio-padrão e na extensão espacial dos eventos.

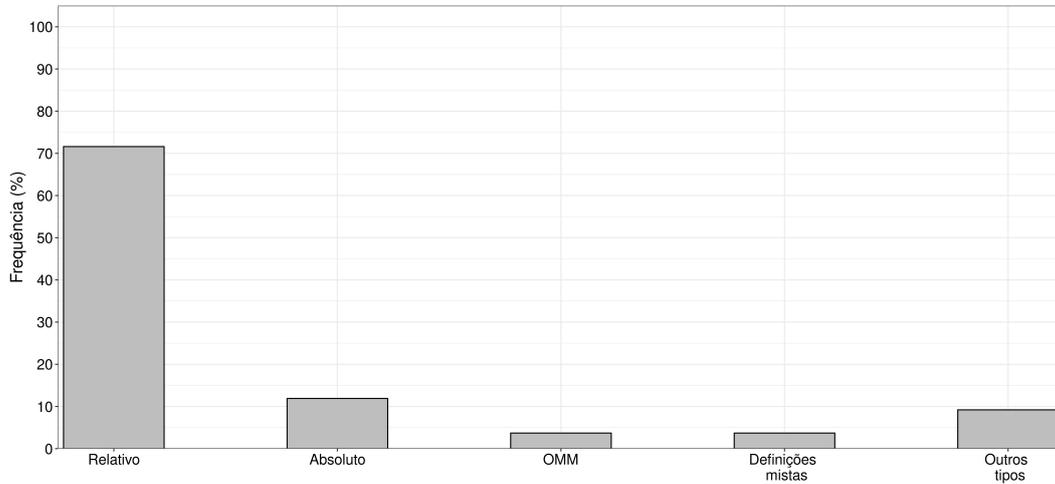
Dentre as abordagens utilizando limiares relativos, destaca-se o índice CTX90pct que tem como definição de 3 dias consecutivos ou mais em que a temperatura máxima do ar excede o percentil 90 diário climatológico de referência (PEZZA et al., 2012; KONG et al., 2020). Dependendo do autor, o percentil é calculado dentro de uma

janela temporal móvel para suavizar os valores. Russo et al. (2015) adotam uma janela de 31 dias, enquanto Geirinhas et al. (2018) e Perkins e Alexander (2013) de 15 dias. Outro parâmetro que pode variar dentre alguns autores é o período de referência, que pode ser 1961-1990, 1981-2010, 1971-2010 ou todo o período de dados disponível (PITICAR et al., 2019). Salienta-se que o CTX90pct não permite identificar a intensidade das OCs, por este motivo essa característica pode ser avaliada a partir da soma da temperatura excedente ao percentil 90 durante cada episódio (DÍAZ et al., 2006; PERKINS-KIRKPATRICK; LEWIS, 2020).

De acordo com Rusticucci et al. (2016), os impactos negativos que os eventos extremos de temperatura causam na saúde e no bem-estar do ser humano permitiram que fossem utilizadas métricas de conforto térmico na identificação dos episódios. Por exemplo, Unal et al. (2013) analisaram os eventos de OCs a partir da temperatura aparente, um índice biometeorológico baseado no efeito sinérgico da temperatura e umidade relativa do ar. Em outro estudo conduzido por Metzger et al. (2010) foi empregado o índice de calor.

Os resultados de Piticar et al. (2019) são apresentados na Figura 2.1, estes autores avaliaram os critérios de identificação das OCs em 109 estudos publicados entre os anos de 2007 e 2018. Eles constataram que 71,6% destas pesquisas utilizaram métricas relativas baseadas em percentis estatísticos. Além disso, os autores destacam a utilidade desta abordagem na identificação dos eventos de OC bem como é ressaltado por (PERKINS, 2015). Notou-se ainda que 11,9% dos trabalhos empregaram limiares fixos semelhante ao utilizado por Huang et al. (2010), 3,7% usaram o HWDI da OMM, a mesma porcentagem das definições mistas como a utilizada por Guo et al. (2017) e a recentemente proposta por Xie et al. (2020). Outras definições foram vistas em 9,2% dos estudos analisados, que se tratam de métricas complexas que não podem ser incluídas nos demais tipos de definições analisadas (PITICAR et al., 2019).

Figura 2.1 - Porcentagem dos tipos de definições utilizadas na identificação das OCs em uma amostra de 109 estudos publicados entre 2007 e 2018.



Fonte: Adaptado de Piticar et al. (2019).

De acordo com Oueslati et al. (2017), o entendimento dos mecanismos físicos associados aos episódios de OCs é de crucial entendimento da gênese, intensificação e previsibilidade destes eventos. Os aspectos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera durante as OCs ainda não foram totalmente explicados na literatura científica, sendo os sistemas de bloqueios atmosféricos, anomalias positivas na pressão em superfície, redução na precipitação e na umidade do solo os principais mecanismos associados (DOLE et al., 2011; LOIKITH; BROCCOLI, 2012).

Na porção subtropical da AS, Cerne e Vera (2011) afirmaram que esses eventos são ocasionados por abrupto aquecimento em baixos níveis da atmosfera que é intensificado pela advecção de ar quente e úmido realizada por sistemas frontais quase-estacionários localizados na região de passagem das *storm-tracks* ao sul do continente. Na porção equatorial da AS, Geirinhas et al. (2017) mostraram que a formação desses episódios está relacionada principalmente com o deslocamento para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), aquecimento na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do oceano Atlântico tropical, anomalias negativas de umidade relativa do ar e alterações no balanço de calor latente e sensível próximo à superfície.

Segundo Della-Marta et al. (2007), na Europa os eventos de OCs são diretamente

relacionados a sistemas de bloqueio atmosférico e anomalias na TSM, mecanismos que perturbam a atividade convectiva no Oceano Atlântico que se associa a trens de Onda de Rossby e permite a formação do fenômeno. [Parker et al. \(2014\)](#) afirmam que no sudeste da Austrália as OCs são associadas a sistemas de alta pressão atmosférica que apresentam expressiva magnitude e lento deslocamento sobre o continente que direcionam correntes de ar quente e seco para essa região. Também foi notada a influência da convecção tropical na duração dos episódios durante o verão austral ([PARKER et al., 2013](#)).

Esses episódios persistentes de calor podem causar impactos negativos em diversos segmentos da sociedade ([MCGREGOR et al., 2007](#)). Com relação a saúde humana, [Pitcar et al. \(2019\)](#) apontaram que esses eventos aumentam a morbimortalidade de doenças relacionadas ao aparelho cardiovascular e respiratório, com os maiores efeitos adversos observados em idosos, mulheres e habitantes de grandes centros urbanos. De acordo com [Zhao et al. \(2019\)](#), durante o verão austral aproximadamente 6% das internações no Brasil são atribuídas à exposição ao calor excessivo. Na Coreia do Sul, [Son et al. \(2014\)](#) mostraram que durante os eventos de OCs se tem um expressivo aumento nas hospitalizações por doenças cardiovasculares. [Nairn e Fawcett \(2015\)](#) assinalaram que na Austrália, Estados Unidos e Europa, as OCs foram responsáveis por mais óbitos do que qualquer outro desastre natural.

Estes eventos também podem impactar negativamente no desenvolvimento e crescimento de diversas culturas agrícolas. De acordo com [Hatfield e Prueger \(2015\)](#), a exposição das plantas à extremas temperaturas limita a capacidade de produção dos frutos, devido à supressão no processo de polinização, esse efeito é diferente entre as espécies, entretanto essa exposição no início do estágio reprodutivo influencia diretamente na produção de grãos e frutas em todas as espécies. Destaca-se também o impacto direto no aumento de eventos de incêndios florestais e queimadas, como os episódios observados na Austrália em 2008/2009 ([PERKINS-KIRKPATRICK et al., 2016](#)), e na Rússia em 2010 ([SHAPOSHNIKOV et al., 2014](#)).

Os resultados de [Añel et al. \(2017\)](#) mostraram que impactos adversos também são observados no consumo e demanda de energia elétrica. Durante os episódios, as elevadas temperaturas afetam a capacidade de geração a partir de queimas de combustíveis fósseis, usinas nucleares e em tecnologias renováveis devido ao exacerbado aumento na temperatura do ar e da água ([HOWDEN; CRIMP, 2001](#); [AÑEL et al., 2017](#)). Fato que evidencia o efeito das OCs sobre a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, podendo levar ao racionamento, apagões e redução no fornecimento.

Dentre os principais eventos de OCs já registrados, destaca-se o analisado por Geirinhas et al. (2019) na região metropolitana do Rio de Janeiro, observado entre os dias 2 e 9 de fevereiro de 2010, responsável por mais de 700 mortes em idosos devido à exposição ao calor excessivo. Ressalta-se ainda o episódio estudado por Shaposhnikov et al. (2014), observado na capital da Rússia também no ano de 2010, no verão, que provocou um aumento de aproximadamente 20% no número de óbitos.

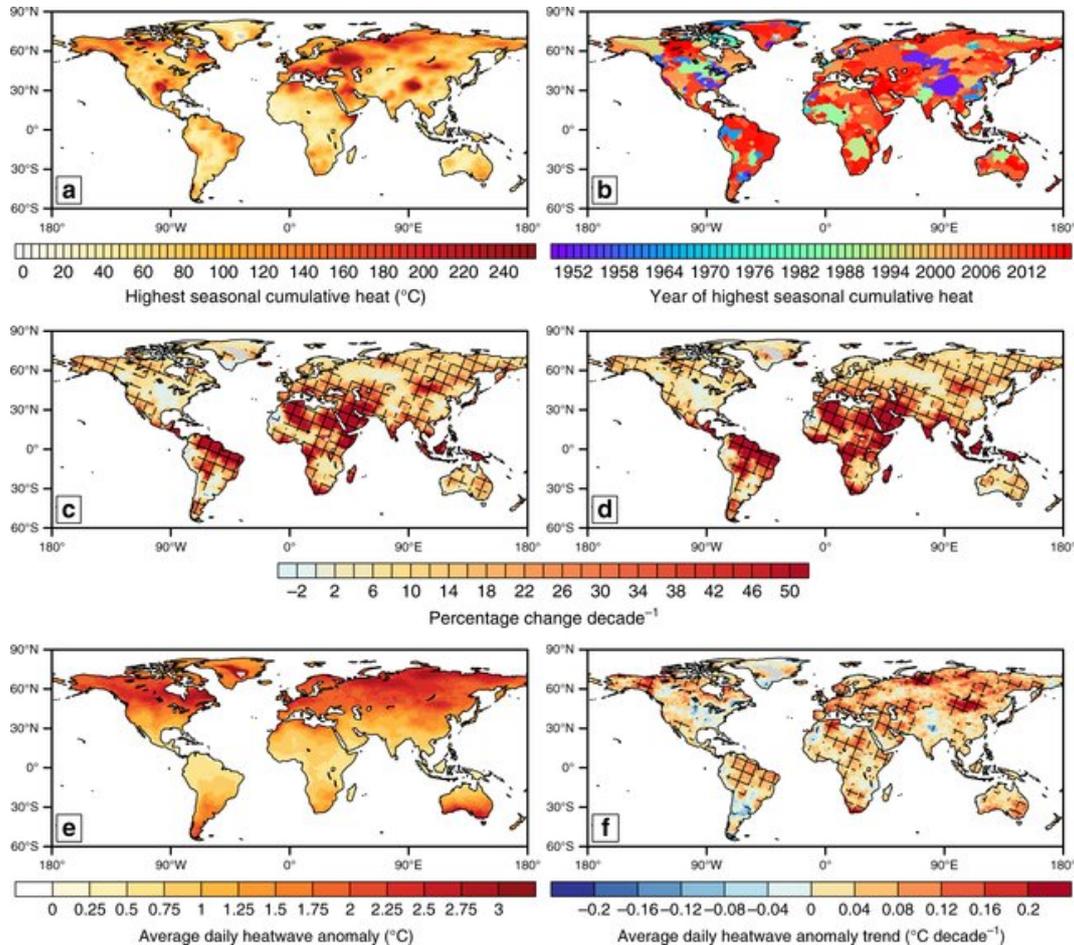
Na Europa, destacam-se os episódios registrados em 2003, 2010 e 2015, que são conhecidos como uns dos eventos mais severos já registrados (RUSSO et al., 2015). O episódio de 2003 ocorreu durante o verão e ocasionou mais de 80.000 óbitos em 12 países europeus com maior letalidade na Áustria, Espanha, França, Itália e Alemanha (DÍAZ et al., 2006; ROBINE et al., 2008; MUTERS et al., 2017). O evento de 2015 também foi observado no verão e de acordo com Hoy et al. (2017), as OCs foram responsáveis por temperaturas recordes em diversas partes do continente.

Guo et al. (2017) mostraram que em simulações do clima futuro, devido ao aquecimento global, as OCs são projetadas a se tornarem mais duradouras, intensas e frequentes. De acordo com Guo et al. (2020), esse aumento pode amplificar consideravelmente o estresse térmico do ser humano e causar maior número de internações e óbitos por doenças relacionadas ao calor. Os resultados de Feron et al. (2019) apontam que na AS é esperado um aumento de pelo menos o dobro dos eventos registrados no clima presente, com impactos mais pronunciados na região tropical e menores na região Sul.

Mudanças nas características dos eventos já podem ser observadas na AS. De acordo com Ceccherini et al. (2016), aumentos acentuados na frequência e intensidade das OCs foram observados nos últimos 10 anos. Mandú et al. (2020) apontaram que esses aumentos foram observados na cidade de Manaus desde o início no final do século XX, e Geirinhas et al. (2017) também identificaram esses aumentos em outras capitais brasileiras, como São Paulo, Brasília e Recife.

A Figura 2.2 de Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020) apresenta mapas globais de tendências em diversos parâmetros das OCs, na qual é possível notar que em diversas partes do mundo se tem um aumento na duração e intensidade, com os eventos de maior intensidade notados nos últimos 20 anos. Os resultados deste estudo ainda apontam que no Nordeste do Brasil e na Amazônia ocorreram os maiores aumentos na duração das OCs em escala decenal.

Figura 2.2 - Mapas globais das estatísticas de calor cumulativo. **a)** o maior calor acumulado sazonal; **b)** ano em que esse valor ocorre; **c)** porcentagem da tendência decenal na mudança do calor acumulado **d)** Porcentagem da tendência decenal no número de dias em OCs; **e)** anomalia média de um dia de onda de calor, **f)** respectiva tendência decenal.



Fonte: Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020).

## 2.2 Ondas de frio

O relatório de 2016 do TT-DEWCE também apresenta uma definição para os eventos de OFs, caracterizados como condição incomum de tempo frio com acentuada queda na temperatura do ar em superfície, que se estende por grandes áreas e persiste por pelo menos 2 dias consecutivos considerando a estação fria (WMO, 2016). De acordo com Malcheva (2017), esses episódios estão normalmente associados com a entrada de ar demasiadamente frio proveniente dos polos para regiões de médias e baixas

latitudes, podendo ser associados também com resfriamento radiativo forçado.

Radinović e Ćurić (2014) definem as OFs como um evento climático extremo ocasionado pelo resfriamento drástico na baixa troposfera, que abrange extensas áreas, induzido pela incursão de ar frio proveniente de altas latitudes. Segundo Reboita et al. (2015), as OFs podem ser caracterizadas por uma sequência de dias em que se tem baixas temperaturas comparadas com limiares arbitrários que afetam de forma negativa diversos segmentos da sociedade. De acordo com Lupo et al. (2001), na porção subtropical da AS, esses eventos são mais frequentes entre maio e setembro. Escobar (2007) mostrou que durante esses meses é notada a presença de intensos anticiclones pós frontais em superfície que ocasionam incursões de ar frio, contribuindo para o resfriamento radiativo que induz perdas noturnas de calor, permitindo, assim, que essas massas de ar frio se mantenham sob essa região por diversos dias consecutivos, produzindo condições favoráveis para a formação de episódios de OFs e geadas.

Assim como as OCs, as OFs possuem 4 principais características de avaliação: magnitude, duração, intensidade e extensão territorial (WMO, 2016). A magnitude é estimada com base em índices que mensuram a redução de temperatura necessária para caracterizar uma OF, a duração reflete a persistência baseada no registro do início e término do episódio. A intensidade expressa o efeito sinérgico da magnitude e persistência, enquanto a extensão territorial informa a área geográfica afetada.

Segundo Malcheva (2017), caracterizações consistentes dos episódios de OFs ainda são escassas não só na Europa, mas em todo o mundo. A escolha da métrica pode ser fundamentada em limiares absolutos, relativos, anomalias de temperatura ou desconforto térmico humano. Estas métricas são baseadas na sua aplicação, por exemplo, limiares absolutos são adequados para gerenciamento de risco WMO (2016). De acordo com Guo et al. (2020), os métodos de identificação dos episódios de OFs apresentam grandes diferenças entre regiões e países. O TT-DEWCE aponta que a intensidade dos eventos pode ser identificada a partir da anomalia negativa acumulada de temperatura do ar inferior ao limite adotado WMO (2016).

Os autores Dash e Mamgain (2011) identificaram os eventos quando o índice de resfriamento pelo vento é menor ou igual a  $10^{\circ}\text{C}$ . Smid et al. (2019) detectaram as OFs quando 3 dias consecutivos ou mais apresentam temperatura mínima diária abaixo do 10<sup>o</sup> percentil diário da temperatura mínima diária, centrado em uma janela de 31 dias, considerando o período de referência de 1981-2010 para calcular os percentis.

Alves et al. (2017) conduziram um estudo na região Sul do Brasil e compararam 10 diferentes métodos de identificação das OFs. No estudo, além de apontadas distinções nas definições, principalmente entre a localidade e estação do ano, foram destacados que os fatores climatológicos da região em estudo são as principais características para selecionar a métrica para identificar os eventos.

Na região subtropical do Brasil, a abordagem adotada por Escobar (2007) utiliza registros de temperatura máxima, média e mínima do ar para calcular os parâmetros da estatística descritiva e identificar os eventos de OFs, que se baseia na magnitude do declínio diário de temperatura do ar e visa priorizar o contraste térmico. O método apresentado por Reboita et al. (2015) é uma adaptação da metodologia proposta por Nairn e Fawcett (2011), que identifica os eventos de OFs quando, no mínimo por 3 dias consecutivos a temperatura média do ar é inferior ao percentil 5 da série histórica analisada.

De acordo com Lupo et al. (2001), os episódios na porção centro-sul da AS tem como principal mecanismo dinâmico a presença de um ciclone extratropical em superfície posicionado na região subtropical do oceano Atlântico que favorece a entrada de ar frio. Também para essa área, Reboita et al. (2015), aplicando a técnica dos padrões de sequências principais, mostraram que os episódios de OFs estão associados com 6 diferentes configurações sinóticas, sendo 4 delas relacionadas com processos advectivos e os demais com processos radiativos.

De acordo com Escobar (2007), três condições sinóticas representam cerca de 70% dos eventos de OFs observados na cidade de São Paulo, com aproximadamente 50% desses eventos associados com sistemas frontais. A primeira e mais típica configuração mostra uma frente fria que se desloca para sudeste com um anticiclone pós frontal em superfície seguindo a mesma trajetória do sistema frontal, e em médios níveis, um ciclone entre o continente e o oceano Atlântico Sul com a presença de uma intensa crista no oceano Pacífico. O segundo padrão é relacionado à ciclogênese observada na região do oceano Atlântico próxima à costa do Sul do Brasil que induz a advecção de ar frio que se estende dessa região até a cidade de São Paulo que acompanha a atividade ciclogênica do sistema. A última configuração está relacionada com a passagem de uma frente fria com deslocamento zonal, e associada a um intenso ciclone no Sul da AS.

Esses eventos de OFs causam expressivo impacto negativo em diversos ramos da sociedade. Cita-se: aumento na poluição atmosférica, problemas na infraestrutura urbana, rompimento em linhas de transmissão de energia, redução na produção

de diversas fontes de energia e, simultaneamente, aumento no consumo de energia elétrica e agravamento de diversas enfermidades (MORABITO et al., 2006; PETERSON et al., 2014; AÑEL et al., 2017). Segundo Mahdi et al. (2015), esses eventos também impactam negativamente culturas que são semeadas durante o inverno na Índia, perdas que acarretam grandes prejuízos anualmente.

De acordo com os resultados de Rytí et al. (2016), em diversos países os episódios de OFs provocam um aumento na mortalidade por doenças relacionadas com os aparelhos cardiovascular e respiratório, apresentando maior letalidade em idosos. Klot et al. (2012) apontam que esses efeitos apresentam influência defasada com maiores impactos dias após a ocorrência do episódio de frio intenso que pode ser diferente entre os grupos etários.

Segundo Guo et al. (2020), quando se tem OFs e os episódios são duradouros, podem ocorrer coberturas de neve espessas e profundas que afetam atividades agrícolas e florestais ocasionando grandes perdas econômicas aos moradores de zonas rurais. Um exemplo desse efeito foi observado no sul da China em 2008 em que a neve, causada pela OF, ocasionou enormes perdas econômicas em toda a região (HU et al., 2014).

Os impactos negativos na geração e distribuição de energia elétrica são diversos, os quais incluem danos nas usinas geradoras, alta redução na produção de gás e petróleo. Além disso, também podem ser observadas falhas na transmissão pelo congelamento das torres e das linhas de transmissão, além de causar racionamentos e cortes no fornecimento da energia elétrica (PANTELI; MANCARELLA, 2015). A exemplo, o histórico apagão ocorrido em 1965 nos Estados Unidos que foi relacionado com a elevada demanda de energia elétrica causada pelas baixas temperaturas induzidas por um evento de OF intenso (HOWELL, 2012).

Referente a mudanças nas últimas décadas, Ceccherini et al. (2016) não identificaram alterações temporais com significância estatística na intensidade das OFs observadas no Brasil. Diferentemente, Bitencourt et al. (2020) apontaram que tanto a intensidade como as demais características das OFs apresentam tendências negativas em todas as regiões do país. Smid et al. (2019) mostraram que essa redução também pode ser observada na Europa e afirmaram que considerando o aquecimento global em cenários futuros, espera-se que essa diminuição seja maior nas próximas décadas.

### 2.3 El Niño Oscilação Sul

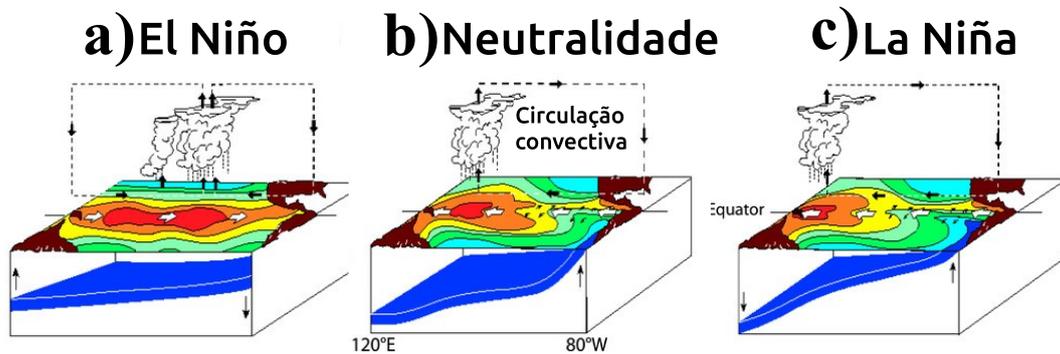
Padrões de oscilação com períodos irregulares observados na circulação atmosférica são denominados de modos de variabilidade (PARKER et al., 2014). Dentre esses modos, destaca-se o ENOS que é um fenômeno de grande escala acoplado oceano-atmosfera que tem ocorrência na escala interanual entre 2 e 7 anos, e cuja componente oceânica oscila entre duas fases extremas, o El Niño (EN) e a La Niña (LN), e Oscilação Sul (OS) é a componente atmosférica. As primeiras observações do EN revelaram a presença de uma corrente quente e fraca na costa do Peru e Equador durante o mês de dezembro próximo ao Natal, dando origem ao nome EN que traduzido para o português significa "O Menino" remetendo ao nascimento do menino Jesus (TRENBERTH, 1997). A componente atmosférica OS é um momento de balanço leste-oeste das massas de ar entre o oceano Pacífico e a Austrália associadas com alterações nos ventos alísios e na pressão ao nível médio do mar (HOREL; WALLACE, 1981).

O ENOS é um modo de variabilidade interanual, apresentando recorrência entre 2 e 7 anos com interações entre o oceano e atmosfera observada em toda a extensão do Pacífico tropical (KILADIS; DIAZ, 1989; CAESAR et al., 2011). Esse fenômeno possui três diferentes fases que são apresentadas na Figura 2.3, neutralidade onde não são observadas alterações na circulação de Walker, EN e LN que são associados, respectivamente, a anomalias positivas e negativas de TSM do Oceano Pacífico tropical central e leste (MCPHADEN et al., 2006).

Condições de EN (Figura 2.3a) são caracterizadas por aquecimento anômalo das águas superficiais com magnitude entre 1,5 e 3°C em toda a zona equatorial do Oceano Pacífico que perturba a circulação atmosférica em diversas regiões do mundo (WANG et al., 2017). De acordo com Ropelewski e Halpert (1987), na presença de EN além do aquecimento na TSM também são notadas alterações no regime de ventos e acúmulos de precipitação. b) ocorrem quando a TSM do Oceano Pacífico tropical estão próximas dos valores climatológicos, os ventos alísios de leste podem produzir corrente oceânicas para oeste (WANG et al., 2017).

Durante a configuração de LN (Figura 2.3c), nota-se TSM mais baixas que as esperadas no oceano Pacífico tropical e intensificação nos processos de ressurgência na porção leste deste oceano (FRAUEN et al., 2014). Isso causa ventos de leste mais intensos ao longo do Equador e, portanto, a piscina quente do Pacífico e chuvas convectivas equatoriais são confinadas próximas à Indonésia (HIDAYAT et al., 2018).

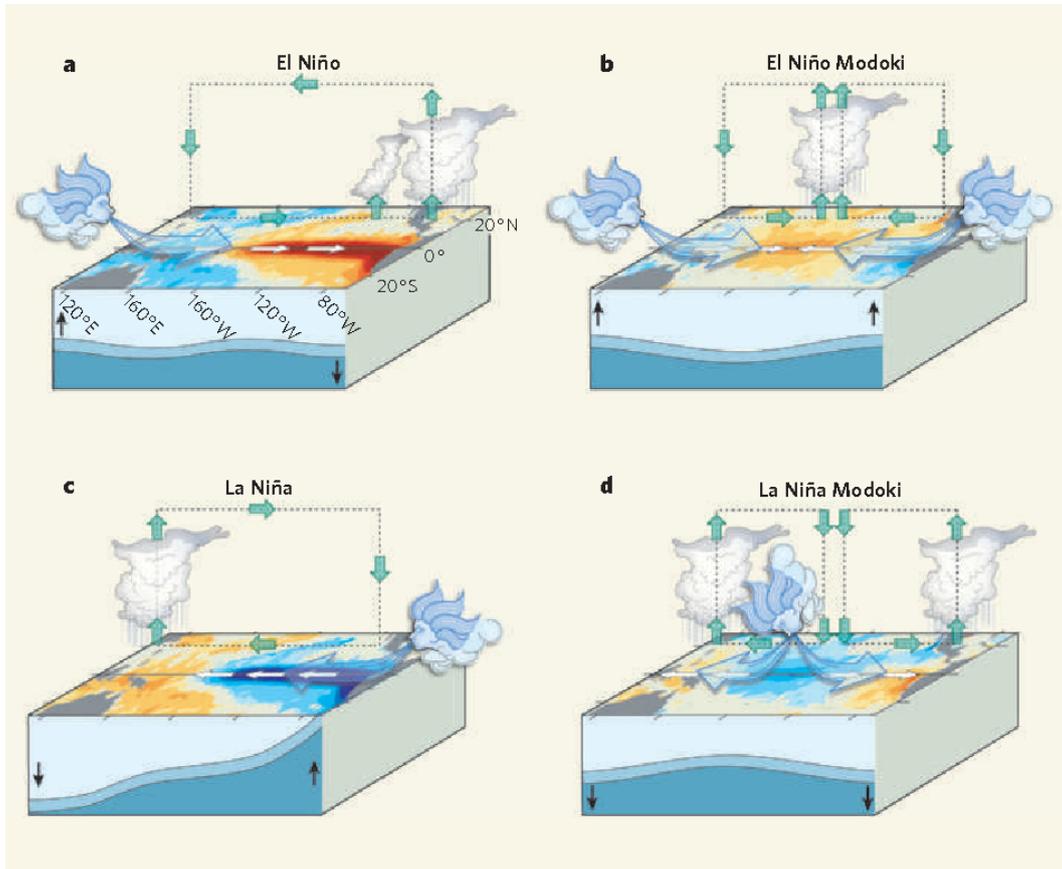
Figura 2.3 - Padrões oceânicos sob condições de a) El Niño, b) Neutralidade, c) La Niña no Oceano Pacífico Tropical.



Fonte: Adaptado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2021).

Estudos realizados nas últimas décadas reconheceram dois diferentes tipos de ENOS que tem como principal diferença a região e a distribuição espacial da região anômala de SST (ASHOK et al., 2007; KUG et al., 2009). De acordo com Yeh et al. (2009), o primeiro tipo de ENOS conhecido é o canônico ou leste, o *Eastern Pacific* (EP) El Niño que são definidos utilizando registros de anomalias de SST na região conhecida como NINO3 que é a média da área de 5°N–5°S, 150°W–90°W, como mostrado por Tedeschi et al. (2015) este tipo de ENOS exerce influência significativa em condições de tempo na AS. O outro tipo é conhecido como El Niño Modoki ou *Central Pacific* (CP) que pode ser identificado a partir da combinação das regiões NINO3 e NINO4 que cobre a área 5°N–5°S, 160°E–150°W. Tedeschi et al. (2013) e Cai et al. (2020) mostraram que as anomalias de precipitação na AS são maiores para El Niños do tipo EP, enquanto que La Niñas CP apresentam aumento na intensidade e extensão espacial.

Figura 2.4 - Esquemas das condições do oceano e circulação na ocorrência de a) El Niño, b) El Niño Modoki, c) La Niña, d) La Niña Modoki.

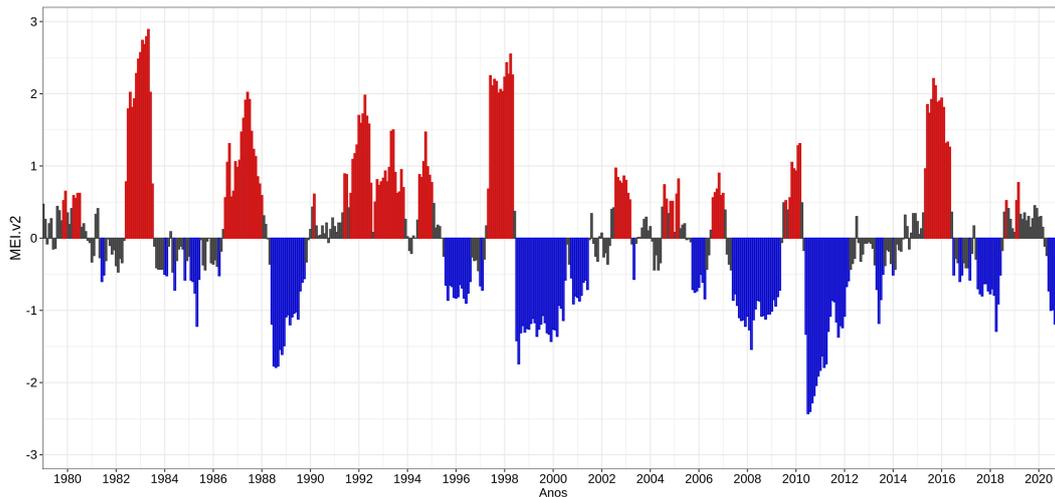


Fonte: Ashok e Yamagata (2009).

O monitoramento e identificação das fases do ENOS pode ser realizada a partir de índices que buscam combinar as principais características do fenômeno em uma métrica única (HANLEY et al., 2003). Dentre essas metodologias, destaca-se o *Multivariate ENSO Index* (MEI), proposto por Wolter e Timlin (1998) determinado como a primeira componente principal da função ortogonal empírica de seis variáveis: Pressão ao Nível do Mar (PNM), componentes zonal e meridional do vento em superfície, TSM, temperatura do ar e nebulosidade total, calculado de forma bimensal. Uma nova versão do MEI, o MEI.v2 foi criado adaptando o índice original a partir da mesma análise de componentes principais de 5 variáveis: PNM, TSM, componentes zonal e meridional do vento e Radiação de Onda Longa (ROL), possuindo como principal diferença a utilização dos campos com exceção da ROL da *Japanese 55-year Reanalysis* (JRA-55) (WOLTER; TIMLIN, 1998; WOLTER; TIMLIN,

2011). Ambas as versões do MEI identificam as fases quente (fria) quando o índice apresenta valor maior (menor) que 0,5 conforme apresentado na Figura 2.5.

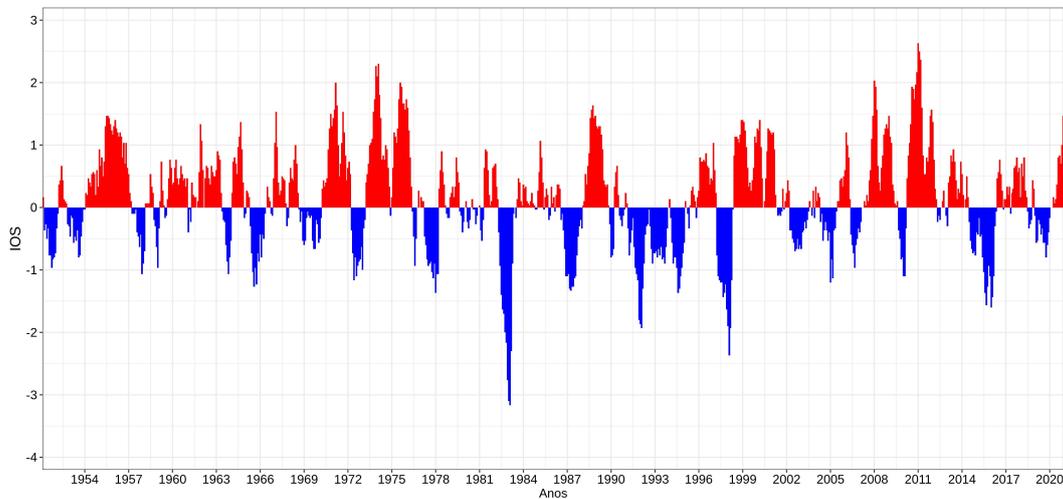
Figura 2.5 - Série temporal para o período de 1979 a 2020 do MEI.v2, os valores em vermelho (azul) indicam a presença da fase quente (fria) do ENOS, enquanto as barras em cinza são condições de neutralidade.



Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2021).

Outra abordagem comumente utilizada na identificação das fases do ENOS é o Índice Oscilação Sul (IOS), trata-se de um índice normalizado baseado na diferença de PNM entre Darwin e o Tahiti, uma medida da OS sendo um indicador do desenvolvimento das fases EN e LN (PARKER, 1983). De acordo com Kiladis e Loon (1988), que empregaram o IOS combinado com o índice de anomalia do Oceano Pacífico tropical leste, definindo o EN (LN) quando a anomalia de TSM é positiva (negativa) por o mínimo três estações com pelo menos 0,5 °C acima (abaixo) da média, e o IOS apresentando valores inferiores (superiores) a -1,0 (1,0) para o mesmo período. A *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) a partir do monitoramento do IOS (Figura 2.6) indica que durante períodos prolongados de valores negativos (positivos) do IOS coincidem com anomalias de aquecimento (resfriamento) nas águas da porção leste do oceano Pacífico que indicam a presença do EN e LN, respectivamente.

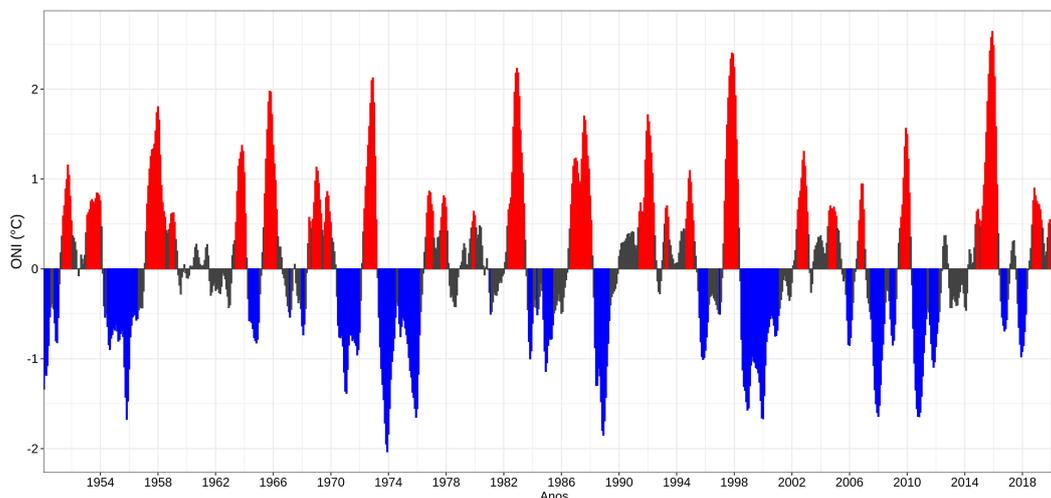
Figura 2.6 - Série temporal da média móvel trimestral do IOS para o período de 1951 a 2020, as barras vermelhas (azuis) são os valores negativos (positivos).



Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2021).

Destaca-se também o *Oceanic Niño Index* (ONI) apresentado na Figura 2.7, que é baseado em anomalias de TSM na região Niño 3.4 ( $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ,  $120^{\circ}\text{W}$ - $170^{\circ}\text{W}$ ) considerando o período de 30 anos como período de referência que é atualizado a cada 5 anos (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2021). A classificação das fases EN (LN) é realizada quando o limite de  $0,5^{\circ}\text{C}$  ( $-0,5^{\circ}\text{C}$ ) é observado por no mínimo 5 meses consecutivos considerando a média móvel de 3 meses, esse período de 5 meses é considerado a fim de suavizar as possíveis variações intrazonais no oceano tropical (TRENBERTH, 1997). De acordo com Yu et al. (2011), anos com a presença de EN fortes são observados quando o ONI é igual ou superior à 1.

Figura 2.7 - Série temporal para o período de 1950 a 2020 do ONI, os valores em vermelho (azul) indicam a presença da fase quente (fria) do ENOS, enquanto as barras em cinza são condições de neutralidade.



Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2021).

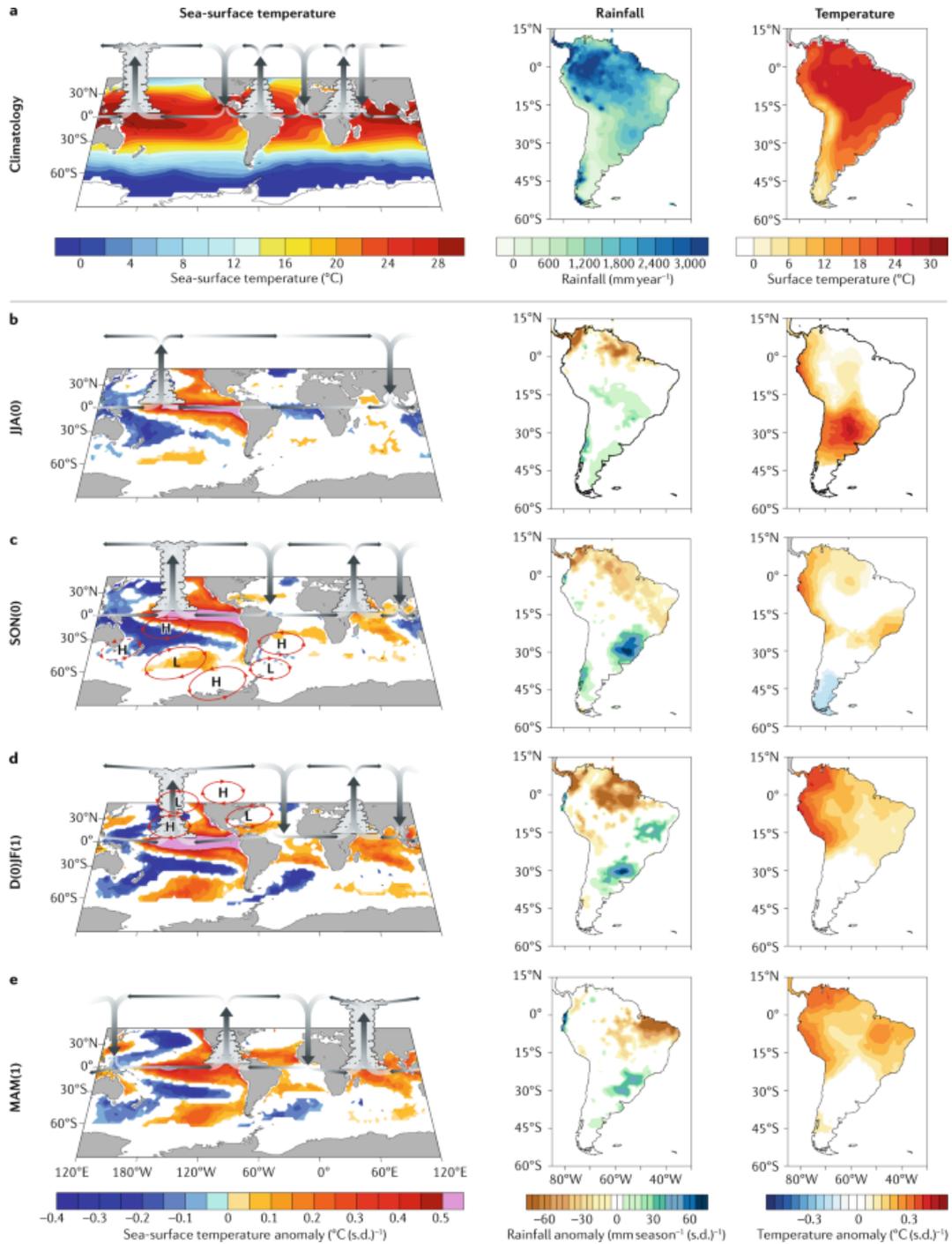
De acordo com Jones e Trewin (2000), o ENOS exerce um importante papel na variabilidade da temperatura do ar, que induz alterações no acumulado de precipitação, nebulosidade e em fluxos de calor sensível e latente. McPhaden et al. (2006) apontam que estes efeitos do ENOS se estendem além da costa do Peru e Equador com uma variedade de efeitos em diversas regiões do mundo. Destaca-se que esses impactos adversos podem ser intensificados por episódios de secas e alterações no uso e cobertura do solo que representam elevado risco a populações locais (MALHI et al., 2008).

Destaca-se ainda que os impactos do ENOS não são limitados na região de ocorrência do evento, apresentando direta influência em regiões extratropicais através dos padrões de teleconexões *Pacific-South American* e *Pacific-North American* (GERSHUNOV; BARNETT, 1998; WANG et al., 2008). Por exemplo, Ropelewski e Halpert (1987) notaram essa influência nas condições meteorológicas em médias latitudes com efeitos pronunciados na região de passagem das *storm-tracks* na América do Norte que induz expressivas anomalias sazonais de precipitação e temperatura do ar.

De acordo com Karoly (1989), a resposta de circulação atmosférica ao ENOS na AS consiste, basicamente, de um trem de onda barotrópica equivalente que se estende em

sentido sudeste a partir do oceano Pacífico tropical central e se desloca no equador em sentido ao continente. No Nordeste brasileiro é observado por [Kousky et al. \(1984\)](#) e [Kayano e Andreoli \(2006\)](#) redução na precipitação durante a fase EN, ocasionado pelo deslocamento para leste do ramo descendente da circulação de Walker. No Sudeste da AS para essa mesma fase do ENOS, [Grimm et al. \(2000\)](#) observaram anomalias ciclônicas ao Sul do continente e anomalia anticiclônica na costa leste da AS, que causaram um aumento na precipitação sobre a região. A [Figura 2.8](#) de [Cai et al. \(2020\)](#) apresenta os impactos do EN na AS para diferentes trimestres.

Figura 2.8 - Evolução de evento típico de EN e seus impactos na AS. TSM (esquerda), precipitação (centro) e temperatura do ar (direita) para os a) valores climatológicos; anomalias trimestrais para b) JJA(0); c) SON(0); d) DJF(1); e) MAM(1). 0 em parênteses indica um EN em desenvolvimento (ano 0) e 1 o ano subsequente em decaimento do EN.



Fonte: Cai et al. (2020).

De acordo com [Kenyon e Hegerl \(2008\)](#), modos de variabilidade de grande escala, em particular o ENOS exerce influência nos eventos extremos de temperatura global, o qual apresenta comportamento diferente entre os extremos quentes e frios. [Alexander et al. \(2009\)](#) mostraram que durante as fases do ENOS em diversas regiões são notadas diferenças estatisticamente significativas na distribuição de probabilidade de extremos de temperatura. A partir de modelos climáticos, [Arblaster e Alexander \(2012\)](#) mostraram que simulações acuradas do ENOS são cruciais para entender a variabilidade dos extremos de temperatura.

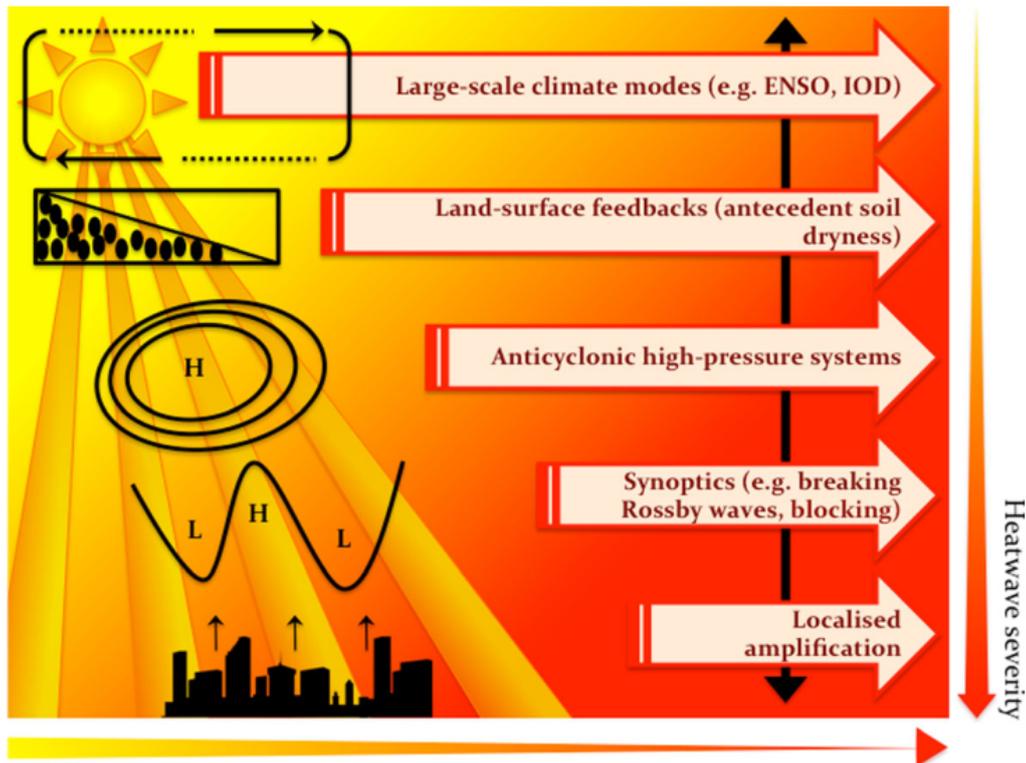
Na porção centro norte do Brasil, [Bitencourt et al. \(2016\)](#) apontaram que as OCs ocorrem em sua maioria na fase EN e de neutralidade, com poucos eventos registrados durante o LN. Os resultados de [Firpo et al. \(2012\)](#) indicam que no estado do Rio Grande do Sul, para o mês de julho, é observada uma relação estatisticamente significativa entre o EN e os episódios de OCs. Segundo [Murari et al. \(2016\)](#), na Índia, durante a ocorrência de EN se tem um maior número de dias de céu claro que aumenta a temperatura do ar em superfície e a ocorrência de OCs, essa associação entre as OCs e dias de céu claro também foi observada no Brasil por [Geirinhas et al. \(2017\)](#).

Conforme [Murari et al. \(2016\)](#), o maior número de OCs observado durante EN está relacionado com o deslocamento para leste da circulação de Walker, que aumenta o número de dias de céu claro, resultando em um maior acúmulo de calor em superfície e conseqüentemente aumento da temperatura. Na Indonésia, [Lin et al. \(2018\)](#) mostraram que as OCs são mais frequentes, intensas e duradouras durante o EN e enfraquecidas na LN, além disso são relacionados com o deslocamento da circulação de Walker que produz condições atmosféricas favoráveis para ocorrência e persistência das OCs no país.

[Oueslati et al. \(2017\)](#) apontam que na região do Sahel o ENOS é um fator chave para a ocorrência de OCs. No Norte e Nordeste da Austrália, [Loughran et al. \(2017\)](#) apontam que o ENOS exerce uma influência direta nos eventos de OCs, principalmente na frequência e duração. [Luo e Lau \(2018\)](#), comparando as características das OCs em anos com a ausência e presença do ENOS no sudeste da China, observaram que durante EN há acentuado prolongamento na duração dos episódios. Os resultados destes estudos corroboram com [Cerne e Vera \(2011\)](#) que indicaram o papel importante que a circulação atmosférica de larga escala e a TSM exercem nos eventos de OCs. Concordando, também, com o esquema dos processos físicos que contribuem para a gênese e amplificação das ondas do estudo de [Perkins-Kirkpatrick](#)

et al. (2016), apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Esquema dos diversos processos físicos que contribuem para OCs, as interações e feedbacks existentes entre eles, e escalas de tempo.



Fonte: Perkins-Kirkpatrick et al. (2016).

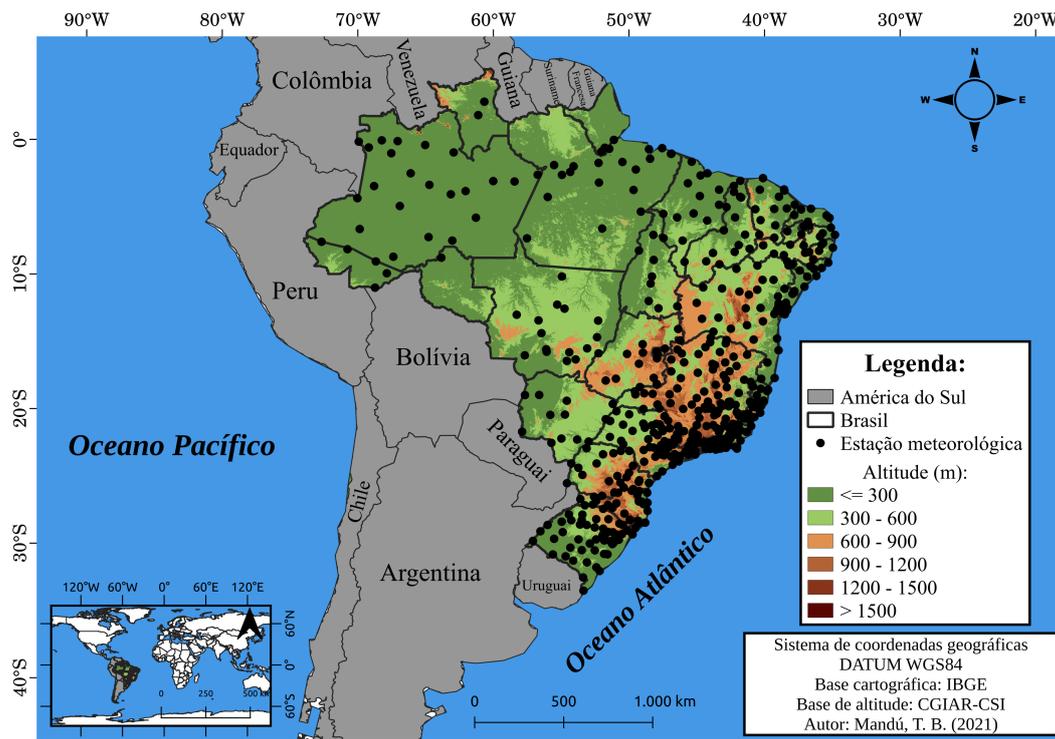
Estudos que buscam avaliar a influência do ENOS nos eventos de OFs ainda são escassos, principalmente sobre a AS (CECCHERINI et al., 2016). Cita-se, Rusticucci (2012) que na porção subtropical do continente, observaram que durante EN as OFs são mais intensas e persistentes entres os meses de maio e agosto no setor Sul. Enquanto que, entre abril e setembro, nas regiões centrais e Norte, os episódios tendem a apresentar menor duração e intensidade. Isso ocorre pois para essa fase do ENOS, ar frio de origem polar é confinado no continente devido as alterações na circulação zonal, o que impede o seu movimento para norte. Enquanto que na LN as OFs apresentam maior prevalência e intensidade do que na fase neutra em junho e julho na região central, e entre os meses de outubro e dezembro no setor nordeste.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo e dados

O estudo foi conduzido no Brasil utilizando 546 estações meteorológicas convencionais. Destas, 544 pertencem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) cujos dados foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), e as estações do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e da Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), localizadas na cidade de Campinas e Piracicaba, respectivamente. Pretende-se utilizar registros diários de temperatura máxima, média e mínima do ar para o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2019, compreendendo um total de 59 anos. Entretanto na análise de agrupamento (Seção 3.3) foi utilizado o período de 1990-2019. Na Figura 3.1 é apresentada a localização geográfica.

Figura 3.1 - Localização geográfica da área de estudo, incluindo o relevo.



Fonte: Produção do autor.

### 3.2 Controle de qualidade dos dados

De acordo com [Reboita e Kruche \(2018\)](#), o controle de qualidade dos dados é a primeira etapa necessária em qualquer estudo que utiliza séries de dados meteorológicos observados, para que as análises posteriores não sejam prejudicadas. [Rusticucci et al. \(2016\)](#) assinalaram que para se estudar eventos extremos de temperatura, precisa-se de uma base de dados submetida a um controle de qualidade. Neste estudo os dados de temperatura máxima, média e mínima foram submetidos a abordagem de [Zhang e Yang \(2004\)](#) anteriormente utilizada por [Keggenhoff et al. \(2015\)](#) e [Regoto et al. \(\)](#), o método visa remover registros espúrios baseado na média e desvio padrão de cada dia do ano do conjunto de dados fora do intervalo, calculado a partir da Equação 3.1.

$$n = \bar{x} \pm 4\sigma \quad (3.1)$$

onde  $n$  são os intervalos positivos e negativos, em que todos os dados acima e abaixo desse intervalo, respectivamente, são removidos;  $\bar{x}$  é a média climatológica diária e  $\sigma$  o desvio padrão diário.

### 3.3 Análise de agrupamento

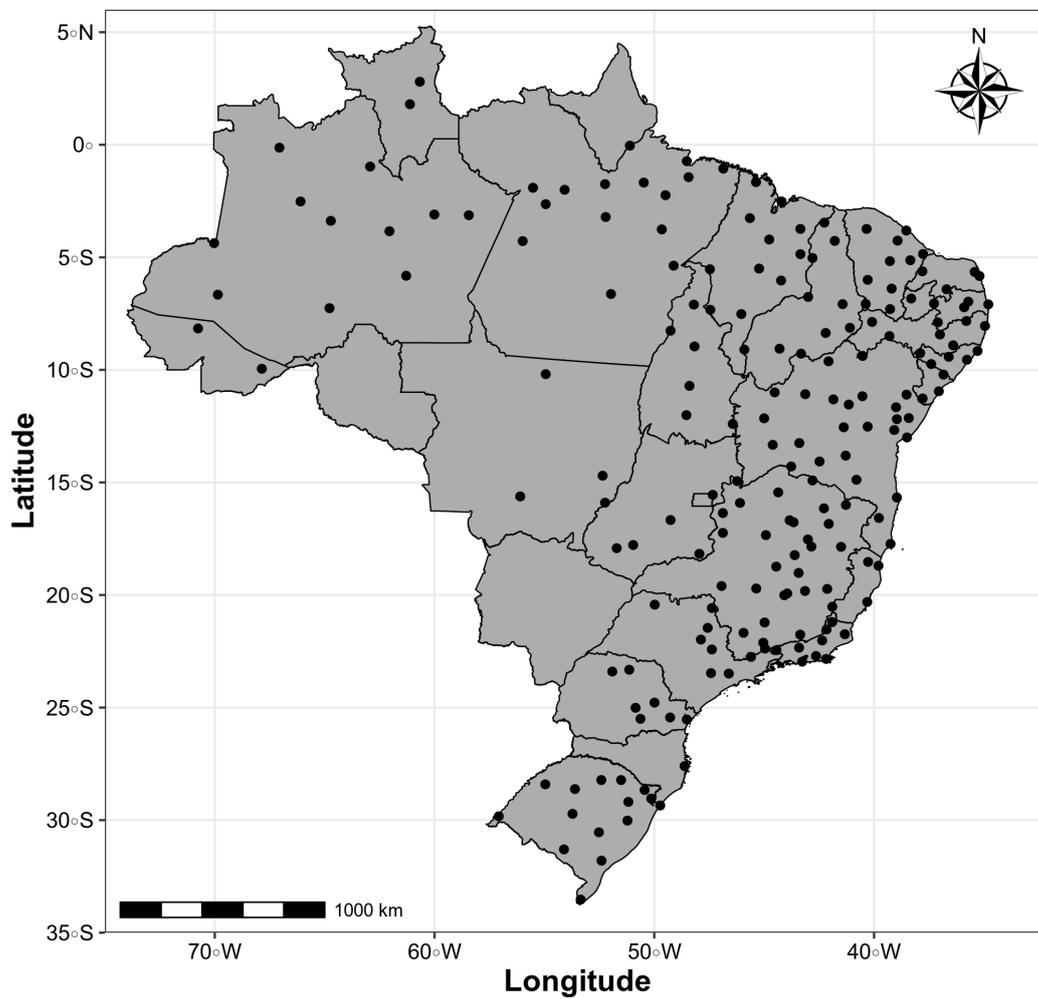
A Análise de Agrupamento (AA) é uma abordagem estatística multivariada que trata da separação de dados em diferentes grupos sem saber com antecedência as identidades desses grupos. Essa técnica avalia o grau de similaridade e diferença entre as observações individuais para definir os grupos homogêneos possuindo como principais características a definição da variável classificatória, especificação da medida de similaridade ou dissimilaridade, seleção do método de agrupamento e escolha do número de grupos ([WILKS, 2011](#)). A variável classificatória foi a média diária da temperatura média do ar referente ao período de 1990 a 2019, escolhido por ser o período climatológico com o maior número de estações com dados disponíveis. Um total de 198 estações apresentadas na [Figura 3.2](#) possuem dados neste período. A medida de similaridade ou dissimilaridade adotada é a distância euclidiana que geometricamente é a menor distância possível entre dois pontos, e é a medida mais comum e intuitiva empregada na AA em estudos meteorológicos ([MIMMACK et al., 2001](#); [WILKS, 2011](#)). De acordo com [Santos et al. \(2015\)](#), a distância euclidiana entre dois elementos  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  e  $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$  é dada por:

$$d_{xy} = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (3.2)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

onde  $n$  é o número de elementos,  $x_i$  e  $y_i$  os elementos que serão comparados.

Figura 3.2 - Estações meteorológicas utilizadas na análise de agrupamento.



Fonte: Produção do autor.

A AA será realizada a partir do método hierárquico e aglomerativo que agrupa os

dados em grupos cada vez maiores à medida que aumenta a dissimilaridade entre eles, empregando como função de ligação o método da variação mínima de Ward ou método de Ward. Proposto por [Ward \(1963\)](#), que de acordo com [Wilks \(2011\)](#) constrói uma hierarquia de conjuntos de grupos, onde cada grupo é formado pela união grupos com base na semelhança levando em consideração a soma dos quadrados das distâncias obtida a partir da distância euclidiana anteriormente calculada.

Na AA hierárquica normalmente a seleção do número de grupos é realizada de forma subjetiva, ou seja, a escolha da quantidade de grupos é feita pelo usuário ([ZHANG et al., 2016](#)). Outra abordagem que pode ser empregada na escolha do número de grupos é a forma objetiva a partir de índices estatísticos. No presente estudo, foi utilizado o índice de *Silhouette*. O Índice de *Silhouette* proposto por [Rousseeuw \(1987\)](#), avalia o número apropriado de grupos considerando a distância entre os pontos de dados dentro do mesmo grupo e a separação entre os pontos de dados em dois grupos vizinhos, variando de -1 a 1, sendo que valores próximos de -1 indicam atribuição do dados ao grupo errado, enquanto valores próximos a 1, atribuição do dado ao grupo correto ([ROUSSEEUW, 1987](#)). O cálculo da média da silhueta de um grupo pode ser obtido a partir da Equação 3.3, conforme realizado por [Silva et al. \(2018\)](#).

$$\bar{s}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(i) \quad (3.3)$$

A largura média da silhueta de um grupo  $\bar{s}(k)$  para todo  $i$  em um grupo é obtida a partir da média de todas as silhuetas individuais ( $s$ ), onde  $n$  é o número de objetos no conjunto de dados. Após a definição dos grupos será feita a espacialização utilizando o método dos polígonos de Thiessen proposto por [Thiessen \(1911\)](#) que realiza a junção dos pontos baseado no plano euclidiano a partir de retas que conectam as estações meteorológicas mais próximas, em seguida são traçadas as linhas médias perpendiculares. Esse procedimento será realizado pois como nem todas as estações foram utilizadas na AA, definindo-se a área de cada grupo, as estações não utilizadas serão usadas na composição das médias dos grupos. A partir da AA da temperatura compensada do ar diária do período de 1961-2019 foram obtidos 4 grupos. Para cada grupo foram obtidas as séries de temperatura máxima e mínima diárias, que calculadas como as médias de todas as estações meteorológicas na área de cada grupo. Estas séries, posteriormente, foram utilizadas para identificar os episódios de OC e OF, conforme será apresentado nas [Seção 3.4](#) e [Seção 3.5](#), respectivamente.

### 3.4 Identificação e caracterização dos eventos de ondas de calor

Foram identificados os eventos de OC nas séries de temperatura máxima diária de cada grupo obtido com AA. Para isso, foi utilizado o índice CTX90pct proposto por Perkins e Alexander (2013), anteriormente empregado no Brasil por Geirinhas et al. (2017) e Bitencourt et al. (2020). Esse índice define os episódios de OC como 3 dias consecutivos ou mais em que a temperatura máxima do ar é superior ao percentil 90 da temperatura máxima diária. Um valor é calculado para cada dia do ano considerando uma janela móvel de 15 dias adotando o período de 1961-2019 como período de referência. O cálculo para cada dia do ano é realizado para considerar o ciclo sazonal da temperatura máxima do ar e a janela móvel é usada para gerar valores mais realistas de percentis (PERKINS; ALEXANDER, 2013). Portanto, para um dado dia  $d$ , o limiar é o percentil 90 do conjunto de dados  $A_d$  definido por:

$$A_d = \bigcup_{y=1961}^{2019} \bigcup_{i=d-7}^{d+7} T_{y,i} \quad (3.4)$$

Onde  $\cup$  é a união de conjuntos;  $T_{y,i}$  é a temperatura máxima do ar diária do dia  $i$  no ano  $y$ .

O índice CTX90pct não permite avaliar a intensidade dos eventos de OC, por este motivo foi utilizada a metodologia de Bitencourt et al. (2020) que é apresentada na Equação 3.5.

$$T(OC) = \frac{1}{D} \left( \sum_D^i (Tmax)_i \right) \quad (3.5)$$

onde  $T(OC)$  é a intensidade dado em °C,  $D$  é a duração do episódio e  $Tmax$  é a temperatura máxima do ar.

A identificação e caracterização das OCs será baseada em seis características, apresentadas na Tabela 3.1, as quais serão analisadas anual, sazonal e mensalmente.

Tabela 3.1 - Características das OCs avaliadas no presente estudo.

Característica	Descrição	Unidade de medida
Ocorrência	Número total de OCs observado	$\eta$
Frequência	Quantidade de dias do ano/estação/mês	
Duração média	Média das durações de cada evento de OC	Dias
Duração máxima	Evento de maior duração registrado	Dias
Intensidade média	Média da soma da intensidade	°C
Intensidade máxima	Evento de maior intensidade	°C

Fonte: Produção do autor.

### 3.5 Identificação e características dos eventos de ondas de frio

A identificação das OF será realizada de forma semelhante à metodologia utilizada para as OC. Será empregada a abordagem de [Bitencourt et al. \(2020\)](#) semelhante a usada por [Smid et al. \(2019\)](#) que define os eventos de OFs como 3 dias consecutivos ou mais em que a temperatura mínima do ar é inferior ao percentil 10 de temperatura mínima. Também neste caso, um valor de percentil por dia do ano é calculado considerando uma janela móvel de 15 dias para o mesmo período de referência adotado na identificação das OCs (1961-2019). Para um dado dia  $d$ , o limiar é o percentil 10 do conjunto de dados  $A_d$  definido por:

$$A_d = \bigcup_{y=1961}^{2019} \bigcup_{i=d-7}^{d+7} T_{y,i} \quad (3.6)$$

Onde  $\cup$  é a união de conjuntos;  $T_{y,i}$  é a temperatura mínima do ar diária do dia  $i$  no ano  $y$ .

A intensidade foi avaliada a partir da metodologia de [Bitencourt et al. \(2020\)](#) que é dada por:

$$T(OF) = \frac{1}{D} \left( \sum_D^i (Tmin)_i \right) \quad (3.7)$$

onde  $T(OF)$  é a intensidade dado em °C,  $D$  é a duração do episódio e  $Tmin$  é a temperatura mínima do ar.

Foram avaliadas as mesmas características das OCs, apresentadas na [Tabela 3.2](#).

Tabela 3.2 - Características das OF avaliadas no presente estudo.

Característica	Descrição	Unidade de medida
Ocorrência	Número total de OFs	$\eta$
Frequência	Quantidade de dias	Dias
Duração média	Média das durações de cada evento de OF s	Dias
Duração máxima	Evento de maior duração registrado	Dias
Intensidade média	Média da soma da temperatura mínima do ar que esteve abaixo do percentil 10 durante os episódios de OF	°C
Intensidade máxima	Evento de maior intensidade registrado	°C

Fonte: Produção do autor.

### 3.6 Definição das fases do El Niño Oscilação Sul

Para definir as fases do ENOS pretende-se utilizar o *Oceanic Niño Index* (ONI) que é baseado em anomalias de TSM do oceano Pacífico tropical na região Niño3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W) considerando uma média móvel de 3 meses (TRENBERTH, 1997). Foram considerados eventos de moderados a extremos, onde alterações de até  $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$  nessas anomalias caracterizam a fase neutra, quando acima (abaixo) de  $0,9^{\circ}\text{C}$  por no mínimo 5 cinco meses consecutivos, o período é caracterizado como EN (LN). Na presente proposta caracterizou-se as fases do ENOS de forma trimestral para o período de 1961 a 2019 a partir dos dados fornecidos pela NOAA que são apresentados na [Tabela 3.3](#).

Tabela 3.3 - Fases do ENOS para cada trimestre durante o período de 1961-2019.

Trimestre	EN	Neutro	LN
<b>DJF</b> (verão)	1964, 1966, 1969, 1973, 1983, 1987, 1988, 1992, 1995, 1998, 2003, 2010 2016. 13 anos	1962,1963, 1967, 1968, 1979, 1981, 1990, 1994, 2002, 2004, 2013, 2014. 12anos	1971,1974, 1976, 1989, 1996, 2000, 2008, 2011, 2012. 9 anos
<b>MAM</b> (outono)	1964,1966, 1969, 1973, 1983, 1987, 1988, 1992, 1995, 1998, 2003, 20102016. 13anos	1962,1963, 1967, 1968, 1979, 1981, 1990, 1994, 2002, 2004, 2013, 2014. 12anos	1971, 1974, 1976, 1989, 1996, 2000, 2008, 2011, 2012. 9 anos
<b>JJA</b> (inverno)	1963,1965, 1968, 1972, 1982, 1986, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2009,2015 . 13anos	1961,1962, 1966, 1967, 1978, 1980, 1989, 1993, 2001, 2003, 2012, 2013. 12anos	1970, 1973, 1975, 1988, 1995, 1999, 2007, 2010, 2011. 9 anos
<b>SON</b> (primavera)	1963, 1965, 1968, 1972, 1982,1986, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2009, 2015 . 13 anos	1961, 1962, 1966, 1967, 1978, 1980, 1989, 1993, 2001, 2003, 2012, 2013. 12 anos	1970,1973, 1975, 1988, 1995, 1999, 2007, 2010, 2011. 9 anos

Fonte: Produção do autor.

### 3.7 Estatística descritiva

As características das OCs e OFs foram avaliadas a partir dos parâmetros de posição e dispersão da estatística descritiva. A média aritmética de uma variável X quantitativa expressa o valor central de um conjunto de dados considerando todos os valores observados, enquanto o desvio padrão expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados em relação à média (MORETTIN; BUSSAB, 2017). Para um conjunto de dados  $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$  a média aritmética pode ser calculada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x \quad (3.8)$$

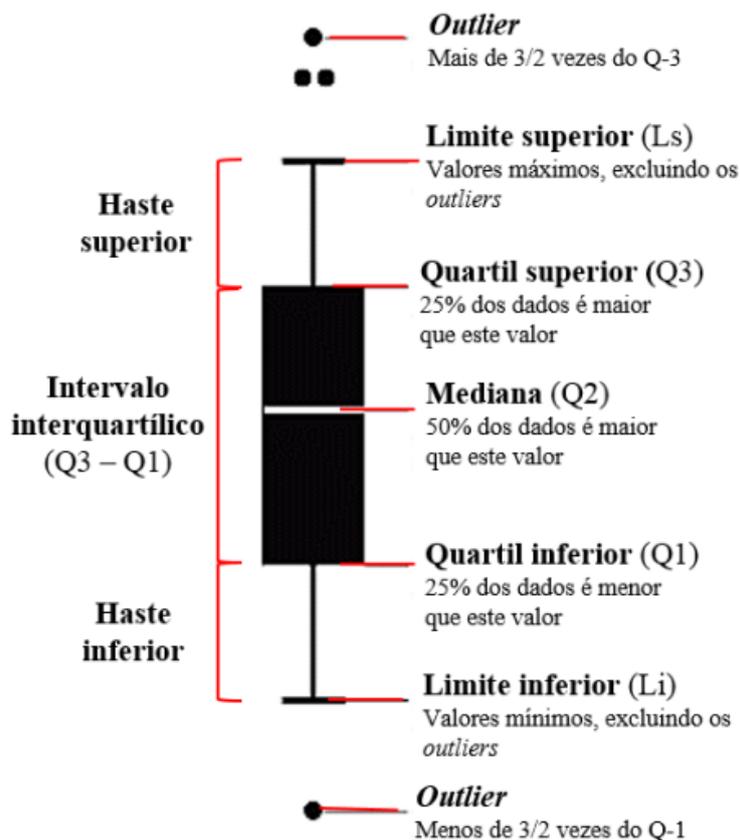
onde  $\bar{x}$  é a média aritmética; n é o número de observações e x o conjunto de dados. O desvio padrão é obtido a partir da seguinte equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (3.9)$$

sendo  $\sigma$  é o desvio padrão;  $x_i$  o valor na posição  $i$  no conjunto de dados;  $\bar{x}$  é a média aritmética e  $n$  o número de observações.

Além da média e do desvio padrão também é possível avaliar outros parâmetros da estatística descritiva através do diagrama de caixa ou *boxplot*, que de acordo com Montgomery (2007) é uma análise gráfica que abrange de forma simultânea diversos aspectos importantes do conjunto de dados, tais como medidas de tendência central e de posição, variabilidade e identificação de pontos discrepantes, conhecidos como *outlines*. Na Figura 3.3 é apresentado o *boxplot* e suas principais características. Pretende-se utilizar essa análise para verificar os aspectos estatísticos das características de calor e de frio.

Figura 3.3 - Estrutura básica do *boxplot*.



Fonte: Valladares et al. (2017).

### 3.8 Testes de tendência temporal

A análise de tendência estatística foi realizada a fim de verificar se há alterações temporais nas características das OCs e OFs nas escalas anual, sazonal e mensal. Para essa análise serão empregados os testes de Mann-Kendall, Pettitt e estimador de inclinação de Sen.

#### 3.8.1 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (MK) proposto por Mann (1945) e Kendall (1948) trata-se de uma metodologia não paramétrica, ou seja, não possui pressupostos relacionados à distribuição dos dados, comumente utilizado no estudo de tendências estatísticas em dados climáticos (SALVIANO et al., 2016; BITENCOURT et al., 2020). De acordo com Wilks (2011), a estatística do teste de MK é baseada nos somatórios dos sinais da diferença (sgn) que é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \text{sgn}(x_{i+1} - x_i) \quad (3.10)$$

onde

$$\text{sgn}(\Delta x) = \begin{cases} +1, & \Delta x > 0, \\ 0, & \Delta x = 0, \\ -1, & \Delta x < 0. \end{cases}$$

Sendo S a variável estatística; n o número de dados;  $x_i$  todos os valores da série de dados; e  $x_{i+1}$  esses valores no futuro. A variável S conta o número de pares de dados adjacentes em que o primeiro valor é menor que o segundo, e subtrai o número de pares de dados em que o primeiro valor é maior do que o segundo. Se os dados  $x_i$  são sequencialmente independentes e extraídos da mesma distribuição, então os números de pares de dados adjacentes para os quais o  $\text{sgn}(\Delta x)$  é positivo e negativo são parecidos entre si. Quando a amostra é igual ou superior à 10, a distribuição da amostra pode ser aproximada à uma distribuição gaussiana, e se a hipótese nula ( $H_0$ ) do teste for verdadeira, essa distribuição gaussiana terá média 0. A variância ( $\text{Var}(S)$ ) desta distribuição é calculada a partir da seguinte equação:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^j t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (3.11)$$

onde  $t_j$  representa a quantidade de repetições de uma extensão  $j$  e  $n$  é o número de dados. Como essa estatística  $S$  se aproxima à uma distribuição normal, o índice  $Z_{mk}$  desta distribuição é calculada por:

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & S > 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & S < 0. \end{cases}$$

Para rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) o valor absoluto de  $Z_{mk}$  deve ser superior a  $Z_{\alpha/2}$ , assim considerando o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), o valor de  $Z$  é  $|1,96|$ , portanto, para este nível de significância, a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é aceita, ou seja, a série de dados analisada apresenta tendência temporal estatisticamente significativa (SALVIANO et al., 2016).

### 3.8.2 Teste de Pettitt

O Teste de Pettitt (TP) será utilizado para identificar o momento em que se inicia a tendência quando o MK indicar a presença das mesmas. Proposto por Pettitt (1979), trata-se de um teste não paramétrico que aponta o ponto de mudança em séries de dados que apresentam tendências estatisticamente significativas. De acordo com Uliana et al. (2015), o TP é baseado na estatística  $U$  de Mann-Whitney ( $U_{t,N}$ ), que avalia se duas diferentes amostras  $x_1, \dots, x_t$  e  $x_{t+1}, \dots, x_N$  são oriundas ou não da mesma distribuição. Para  $t = 2, 3, \dots, N$  a estatística  $U_{t,N}$  é calculada por:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N sgn(x_t - x_j) \quad (3.12)$$

$$sgn(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0, \\ 0, & \text{se } x = 0, \\ -1, & \text{se } x < 0. \end{cases}$$

Essa estatística conta as vezes que o valor da primeira amostra excede a segunda, sendo que a hipótese nula do teste ( $H_0$ ) indica que a série temporal analisada não apresenta um ponto de mudança. A estatística  $k_t$  indica o ponto de mudança para  $t$  significativo no qual  $U_{t,N}$  é máximo e associado a um nível de significância que pode ser calculado pelas equações abaixo:

$$k_t = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (3.13)$$

$$P = 2e^{\left\{ \frac{-6(K_N)^2}{N^3 + N^2} \right\}} \quad (3.14)$$

onde  $P$  é o nível de significância;  $K_N$  é o valor crítico; e  $N$  é o número de dados da série de dados.

### 3.8.3 Teste de estimador de tendência de Sen

O Teste de Estimador de Tendência de Sen (Se) indica a magnitude das tendências identificadas pelo teste MK, portanto este teste será usado para identificar a magnitude das tendências que forem observadas nas características das OCs e OFs. O teste Se foi proposto por Sen (1968), trata-se também de um teste não paramétrico que a partir da mediana dos dados permite avaliar a inclinação da série temporal. De acordo com Natividade et al. (2017), o cálculo do teste Se para  $n$  pares de dados é dado por:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (3.15)$$

para  $i = 1, \dots, n$ ,  $x_j$  e  $x_k$  são os valores das séries temporais  $j$  e  $k$  ( $j > k$ ) respectivamente. Os valores de  $n$  e  $Q_i$  são ordenados de forma decrescente, e a mediana da inclinação caso  $n$  seja um número ímpar é dada por  $Q_{\text{med}} = Q_{\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor}$  e por  $Q_{\text{med}} = \frac{Q_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} + Q_{\lfloor \frac{n+2}{2} \rfloor}}{2}$ , caso  $n$  seja par.

### 3.9 Transformada em ondeletas

Para verificar as principais escalas de tempo dominantes nas características das OCs e OFs, empregou-se a Transformada em Ondeletas (TO), uma análise espectral que investiga as variações localizadas dentro de série de tempo, a partir de um conjunto de funções de forma geradas por dilatações  $\psi(t) \rightarrow \psi(2t)$  e translações  $\psi(t) \rightarrow \psi(t+1)$  de uma função base conhecida como ondeleta mãe  $\psi(t)$  (BOLZAN, 2006). Neste estudo, empregou-se utilizar a transformada em ondeleta de Morlet, que de acordo com Torrence e Compo (1998) consiste em uma onda plana modulada por uma função gaussiana dada por:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}} \quad (3.16)$$

sendo  $\eta$  o parâmetro de tempo adimensional;  $\omega_0$  a frequência adimensional considerada, igual à 6 para satisfazer a condição de admissibilidade  $\psi_0(\eta)$  (FARGE, 1992; GRINSTED et al., 2004).

Segundo Torrence e Compo (1998), a transformada em ondeletas contínua de uma sequência discreta  $X_n$  é definida como a convolução de  $X_n$  baseada em uma versão dimensionada de  $\psi_0(\eta)$ :

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi * \left[ \frac{(n' - n)\delta t}{s} \right] \quad (3.17)$$

onde \* indica o complexo conjugado que varia a escala da ondeleta  $s$  que translada no índice de tempo localizado  $n$ . Torrence e Compo (1998) indicam que o espectro global de potência das ondeletas que é baseado na média de todos os espectros locais, dado por:

$$\overline{W^2}(s) = \frac{1}{N} \sum_{n'=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (3.18)$$

### 3.10 Relação entre fases do ENOS e eventos extremos de temperatura

#### 3.10.1 Comparativo entre as fases do ENOS

Foram analisadas as características das OCs e OFs anteriormente apresentadas para cada fase do ENOS de forma trimestral a fim de verificar se são observadas alterações nos parâmetros das OCs e OFs induzidas pelas fases do ENOS. Como observado na Tabela 3.3.



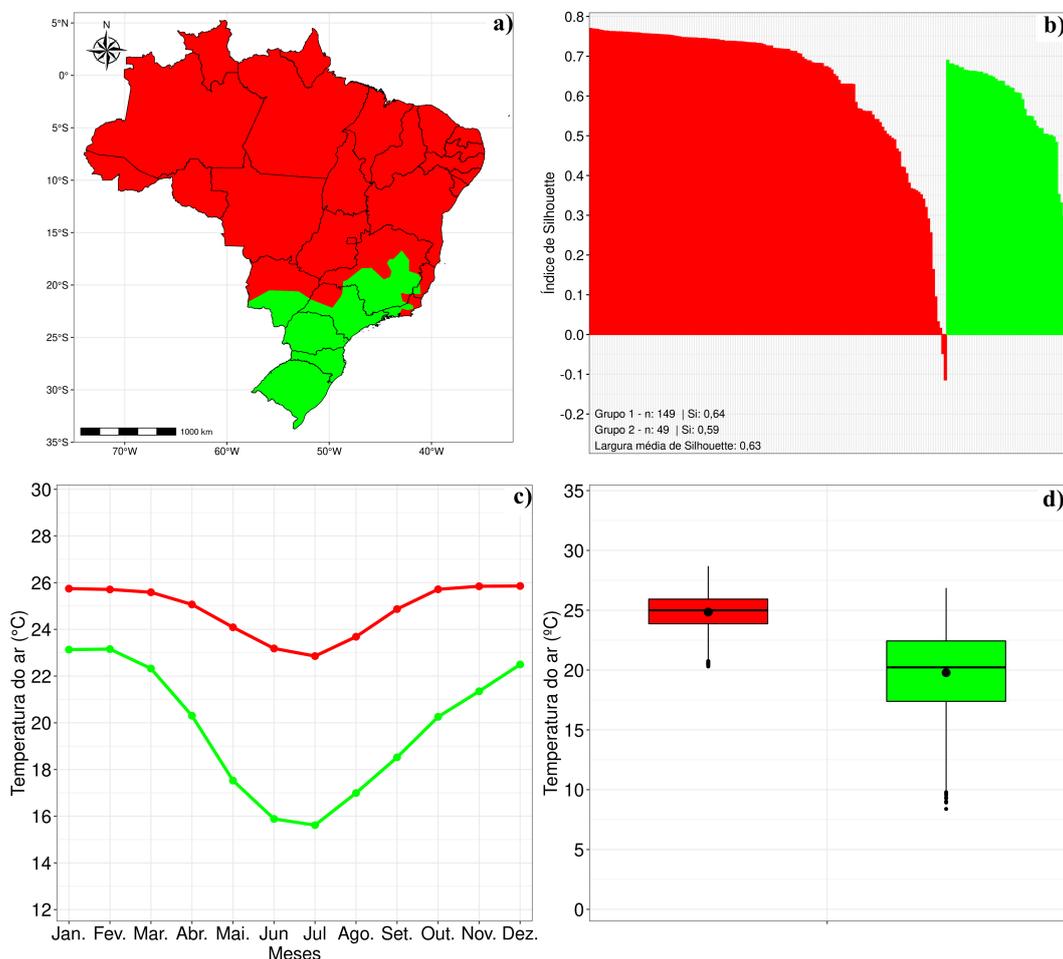
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Regionalização da temperatura compensada do ar

Na regionalização de 2 grupos (Figura 4.1a), o grupo 1 apresenta maior extensão espacial cobrindo completamente as regiões Norte e Nordeste e parte do Centro-oeste e Sudeste, enquanto que o grupo 2 engloba a região Sul e parte dos estados do Mato Grosso do Sul, São Paulo e Minas Gerais. Essa divisão concorda com a classificação climática de Köppen-Geiger atualizada para o Brasil por Alvares et al. (2013b), na qual o grupo 1 apresenta clima predominante tropical e em parte do Nordeste é árido, já o grupo 2 é classificado como temperado. Na Figura 4.1b é exposto o índice de *Silhouette* em que o valor médio é de 0,64, que é superior ao observado por Araújo et al. (2019) para a região Nordeste do Brasil.

O comportamento sazonal (Figura 4.1c) aponta que para o grupo 1 as temperaturas são mais altas para o período de outubro a fevereiro, enquanto as mais baixas ocorrem entre maio e setembro. No grupo 2 o padrão sazonal mostra as estações do ano claramente definidas, diferente do grupo 1 que por se estender em grande parte da região tropical não apresenta as 4 estações do ano bem definidas (FISCH et al., 1998). Para esse grupo a amplitude térmica é maior, com os máximos observados no trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro e os mínimos em junho, julho e agosto, que são os meses de verão e inverno no hemisfério Sul, respectivamente. A Figura 4.1d ilustra a variabilidade da temperatura do ar nos dois grupos, com a média do grupo 1 de aproximadamente 25°C e variabilidade de 2,6°C, e no grupo 2, com média de 19,2°C e variabilidade de 4,6°C. A maior variabilidade no grupo 2 decorre de passagens de sistemas transientes de latitudes médias como as frentes frias que causam expressivas variações térmicas (REBOITA et al., 2010).

Figura 4.1 - a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de *Silhouette* para os 2 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) *Boxplots* dos grupos. Em vermelho é indicado o grupo 1 e o grupo 2 é representado pela cor verde.



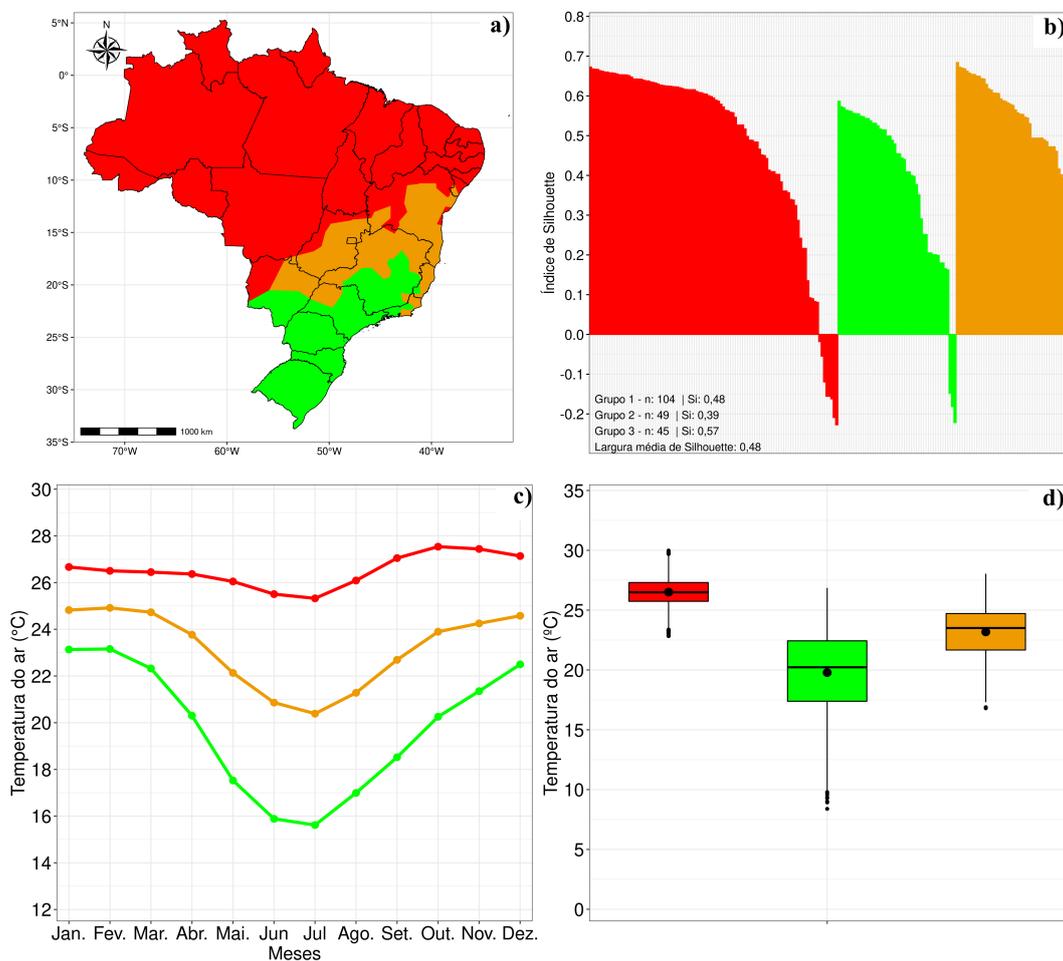
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.2a é apresentado a regionalização de 3 grupos, na qual o grupo 3 é parte do grupo 1 na regionalização de 2 grupos (Figura 4.1a), cobrindo parte dos estados do Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro. Essa região tem a influência da ZCAS e da Alta Subtropical do Atlântico Sul (MA et al., 2011; CARPENEDO; AMBRIZZI, 2020). A Figura 4B mostra o índice de Silhouette para esse número de grupos, com o maior valor de 0,57 para o novo grupo criado. Destaca-se que com o aumento para 3 grupos o valor médio de 0,48 é inferior da regionalização de 2 grupos cuja média é de 0,63 (Figura 4.1b). Portanto a inclusão de novos grupos pode diminuir a média do índice conforme também notado

por Santos et al. (2015) e (AHMADI et al., 2018).

O comportamento sazonal na regionalização de 3 grupos é mostrado na Figura 4.2c. No grupo 1 desta regionalização, notam-se maiores valores médios para todos os meses com o período de maiores temperaturas (valores próximos à 28°C), entre setembro e novembro diferente do observado na regionalização de 2 grupos (Figura 4.1c). Isso decorre do fato da área do grupo 1 estar mais a norte do país, como acima mencionado nesta região o ciclo sazonal não apresenta todas as estações do ano, diferente dos demais grupos. Os aspectos gerais da variabilidade dos grupos 1 e 2 (Figura 4.2d) são similares aos dos correspondentes grupos (1 e 2) da regionalização de 2 grupos, mas o 3º grupo apresenta média em torno de 22°C com maior variabilidade do que a do grupo 1, devido as suas posições geográficas, em conformidade com (ALVARES et al., 2013a).

Figura 4.2 - a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de *Silhouette* para os 3 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) *Boxplots* dos grupos. Em vermelho é indicado o grupo 1, o grupo 2 é representado pela cor verde e o grupo 3 pela cor laranja.



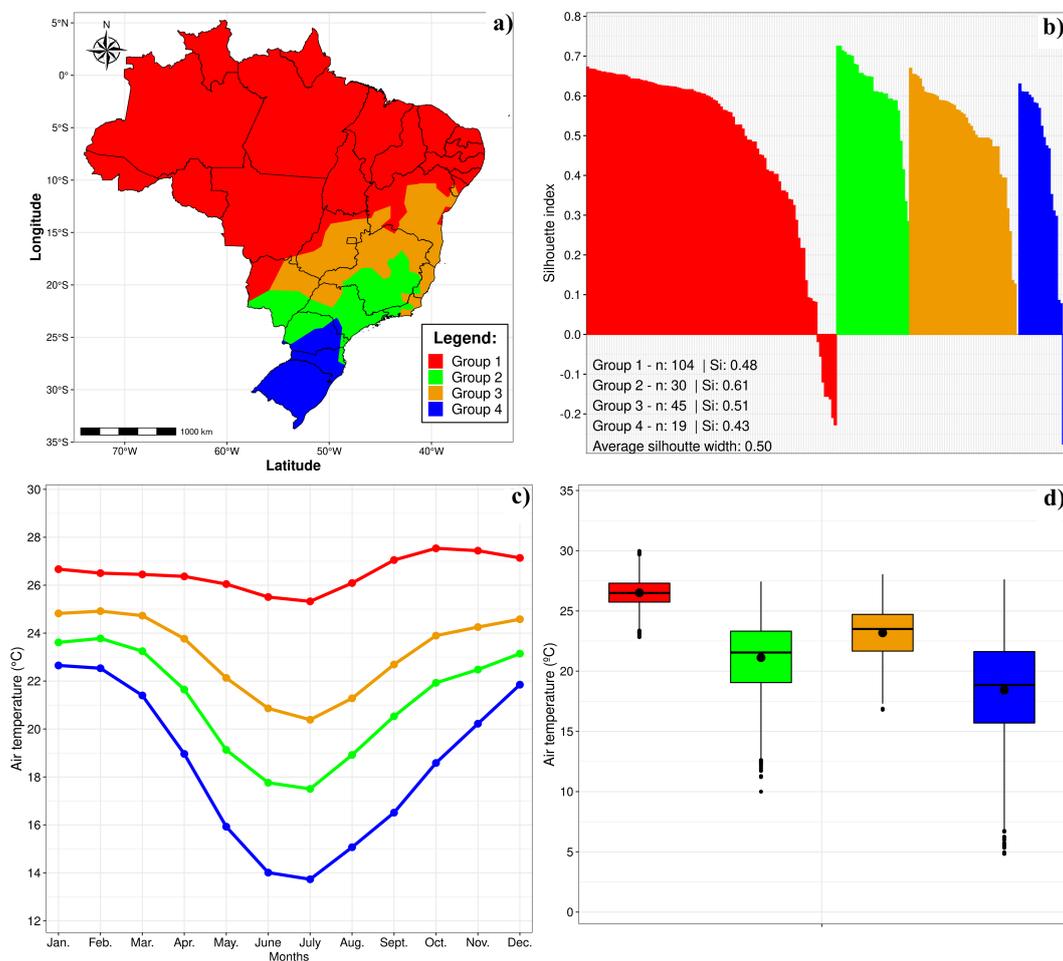
Fonte: Produção do autor.

A regionalização de 4 grupos é apresentada na [Figura 4.3a](#), na qual o novo grupo, grupo 4, compreende o setor Sul do país, e abrange completamente o estado do Rio Grande do Sul e partes de Santa Catarina e Paraná. O índice de *Silhouette* ([Figura 4.3a](#)) apresenta o maior valor no grupo 2 (0,61), o menor no grupo 4 (0,43), a média de 0,50 superior ao notado para a regionalização de 3 grupos, mas inferior ao observado para 2 grupos.

A partir da [Figura 4.3c](#) nota-se que o grupo 4 apresenta ciclo sazonal semelhante

aos dos grupos 2 e 3, com as maiores temperaturas entre dezembro e fevereiro e as menores no período de junho a agosto. No entanto, destaca-se que o grupo 4 apresenta as menores temperaturas para todos os meses, com média próxima de 13°C para os meses de junho e julho (Figura 4.3c). Na Figura 4.3d notam-se as médias de 26,5°C, 21,1°C, 23,2°C e 18,4°C para s grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, com as maiores variabilidades nos grupos 4 (5,9°C) e 2 (4,3°C), as menores para os grupos 1 (1,6°C) e 3 (3°C). A maior variabilidade nos grupos localizados nas regiões Sul e Sudeste do país decorre da atuação de distúrbios extratropicais, sistemas transientes como os sistemas frontais assim como mecanismos que provocam elevadas temperaturas, como os bloqueios atmosféricos e verânicos (SILVA et al., 2015; JACONDINO et al., 2018). Esses sistemas atmosféricos são mais intensos nas regiões que apresentam maior variabilidade.

Figura 4.3 - a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de *Silhouette* para os 4 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) *Boxplots* dos grupos. Em vermelho é representado o grupo 1, em verde o grupo 2, em laranja o grupo 3 e em azul o grupo 4.



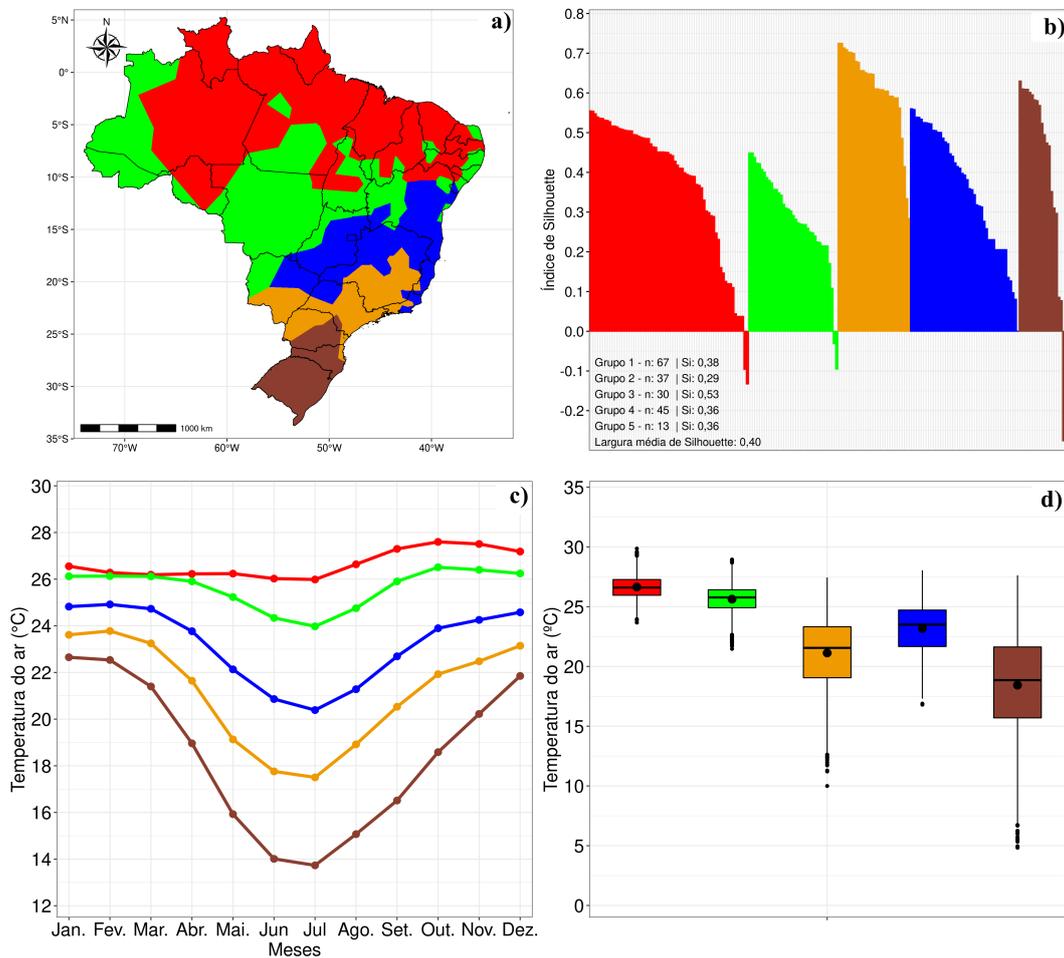
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.4a é apresentado a regionalização de 5 grupos. Com esta regionalização, tem-se uma subdivisão do grupo 1 da regionalização de 4 grupos (Figura 4.3a) em dois grupos: um mais ao norte e outro ocupa a região central do Brasil e partes do Norte e Nordeste. O índice de *Silhouette* (Figura 4.4b) apresenta média de 0,40 com o maior valor para o grupo 3 (0,61) e menor para o grupo 2 (0,29).

Analisando o ciclo sazonal na Figura 4.4c, observa-se que o comportamento entre os grupos 3, 4 e 5 é semelhante com as maiores temperaturas no verão e as menores

no inverno, diferente do notado para os grupos 1 e 2 que apresentam os máximos no período de setembro a novembro. Os grupos 1 e 2 mostram similaridades com média próxima a 26°C, e variabilidade inferior a 3°C (Figura 4.4d), porém outliers próximos a 30°C só foram observados no grupo 1. Também, nenhuma observação inferior a 20°C ocorreu nos grupos 1 e 2, diferentemente dos demais grupos.

Figura 4.4 - a) Grupos homogêneos sobre o Brasil; b) Índice de *Silhouette* para os 54 grupos; c) Comportamento sazonal dos grupos; d) *Boxplots* dos grupos. Em vermelho é representado o grupo 1, em verde o grupo 2, em laranja o grupo 3, em azul o grupo 4 e em marrom o grupo 5.



Fonte: Produção do autor.

Analisando as regionalizações, o maior valor médio do índice de *Silhouette* é para a de 2 grupos (0,63), seguido de 4 grupos (0,50). Estes valores são superiores aos

encontrado por Araújo et al. (2019) para a região Nordeste do Brasil utilizando dados de temperatura da reanálise *Era-Interim*, e aos de Santos et al. (2015) para a precipitação utilizando dados observados para a região Amazônica. Assim, essa métrica estatística indica que entre as regionalizações apresentadas a regionalização de 2 e 4 grupos são as mais indicadas.

A espacialização dos grupos, principalmente para a regionalização de 4 grupos concorda com a ocorrência de sistemas meteorológicos, como a atuação da ZCIT na região Norte do grupo 1, pois esse sistema exerce influência na precipitação e condições térmicas dessa região Wang e Fu (2007), Utida et al. (2019), assim como é uma região afetada pela Alta da Bolívia e VCAN (REBOITA et al., 2010). Na região do grupo 2 os principais sistemas atuantes são principalmente a ZCAS e sistemas frontais, que afetam as condições térmicas da região e podem causar condições extremas de temperatura (SOUZA; AMBRIZZI, 2003; CAPUCIN et al., 2019). Para a área do grupo 3 tem a região de atuação da ZCAS, que influencia diretamente na temperatura do ar nesta região uma vez que altera os acumulados de precipitação e transporte de umidade (QUADRO et al., 2012). No grupo 4 tem-se as influências de sistemas frontais, linhas de instabilidade e também de ciclones explosivos (GAN; RAO, 1991; GOBATO; HEIDARI, 2020).

Em relação a variabilidade nos grupos se explica pelos aspectos climáticos. A baixa amplitude térmica e altas temperaturas no grupo 1 concordam com os resultados de Silva et al. (2018). Na área de abrangência deste grupo tem-se as maiores médias e menores valores de desvio padrão, pois na região equatorial do Brasil devido a posição geográfica tem-se baixas variações de temperaturas e altas temperaturas durante o ano inteiro quando comparado com o restante do país (FISCH et al., 1998). Para os grupos localizados nas regiões Sul e Sudeste, o comportamento é o inverso com as menores médias e maior variabilidade. Segundo Alvares et al. (2018), essa região sofre influência de sistemas atmosféricos que causam expressiva amplitude térmica e condições extremas como as geadas, evidenciadas nos boxplots com registros inferiores a 10°C.

## 4.2 Caracterização espaço-temporal

### 4.2.1 Ondas de calor

A Tabela 4.1 apresenta características estatísticas descritivas dos números de eventos de OC em cada grupo. O maior número de OC ocorreu no grupo 3 seguido do grupo 2, e o menor no grupo 1. Dos 59 anos analisados, no grupo 1 aproximadamente 50%

tiveram registros de OC, enquanto que nos demais grupos a porcentagem é superior a 80%. A média aponta valores próximos entre os grupos, indicando que de maneira geral no Brasil ocorrem cerca de 4 episódios de OC por ano. Os maiores desvios-padrão aparecem nos grupos 1 e 3. Isso confirma que maior variabilidade interanual dos eventos OC ocorre em regiões mais próximas da faixa equatorial, resultado consistente com o de [Bitencourt et al. \(2016\)](#). O máximo de eventos registrados em um ano (23 eventos) ocorreu no grupo 1, em concordância com [Geirinhas et al. \(2018\)](#) que encontraram, dentre as capitais analisadas, máximos em Manaus e Recife, cidades na área de abrangência do grupo 1.

Tabela 4.1 - Características das OF avaliadas no presente estudo.

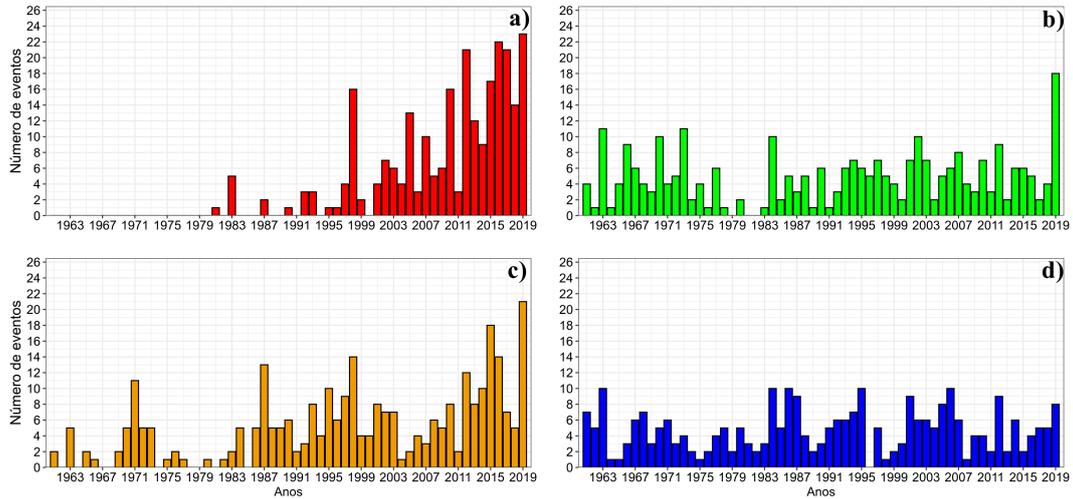
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Número de eventos	255	282	297	280
Número de anos com eventos (%)	30 (50,8%)	56 (94,9%)	50 (84,7%)	58 (98,3%)
Média anual	4,3	4,8	5,0	4,7
Desvio-padrão anual	6,6	3,4	4,7	2,7
Máximo anual	23	18	21	10

Fonte: Produção do autor.

A [Figura 4.5](#) apresenta a distribuição anual dos episódios de OC em cada grupo. No grupo 1 é notado um aumento gradual do número de eventos entre 2001 e 2019, destacando também neste período ocorrências de OC em todos os anos, característica notada anteriormente por [Mandú et al. \(2020\)](#) na cidade de Manaus. Nos grupos 2 e 4, localizados mais a sul do país, notou-se uma distribuição mais uniforme no número de episódios no período 1961-2019, que pode ter sido relacionada com a maior ocorrência de sistemas meteorológicos que favoreceram a gênese das OC, como o deslocamento para Sul da ZCIT. De acordo com [Cerne e Vera \(2011\)](#) estes são os sistemas transientes quase-estacionários. Vale destacar as altas ocorrências de OC, principalmente nos grupos 1 e 3, nos anos de 1983, 1987, 1998 e 2015 que coincidiram com a atuação da fase quente ENOS. De acordo com [Oueslati et al. \(2017\)](#), o ENOS na fase quente favorece a ocorrência de OC, relação esta já notada no estado do Rio Grande do Sul por [Firpo et al. \(2012\)](#) e na porção centro-norte do país por [Bitencourt et al. \(2016\)](#). Ainda, em 2019 ocorreu o maior número de OC nos grupos 1, 2 e 3 que pode ter sido associado com a seca deste ano na região central da América do Sul ([MARENGO et al., 2021](#)), que é um extremo climático que pode favorecer a ocorrência das OC conforme foi mostrado por ([GEIRINHAS et al.,](#)

2021).

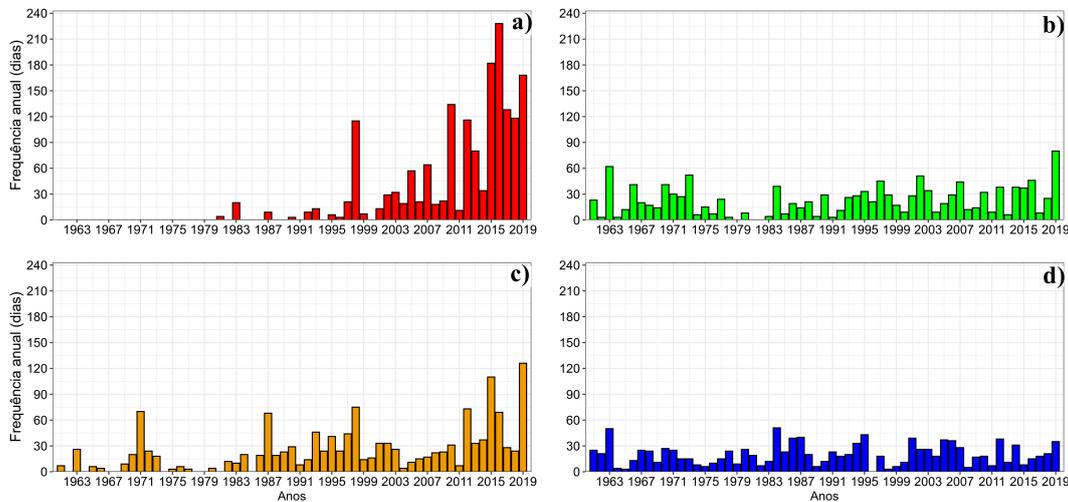
Figura 4.5 - Ocorrência anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

A frequência anual é mostrada na [Figura 4.6](#). No grupo 1, mesmo que o maior número de eventos tenha sido registrado em 2019 a frequência foi de 168 dias, enquanto que para 2016 a frequência foi 228 dias, cobrindo mais de 60% dos dias deste ano, destacando também os 182 dias registrados em 2015. Em 2015/16 ocorreu um episódio de seca sem precedentes na região Amazônica associado com a ocorrência da fase quente do ENOS ([JIMENEZ et al., 2018](#)) o que pode ter influenciado o elevado número de dias em OC. No grupo 2, a frequência apresentou valores máximos próximos a 60 dias, com os máximos em 2019 (80 dias) e 1963 (62 dias). No grupo 3, o maior registro de 126 dias ocorreu em 2019, seguido de 2015 (110 dias) que foram os únicos anos com registros superiores a 90 dias. No grupo 4, os máximos não ultrapassaram 60 dias, destacando os anos de 1984 (51 dias) e 1963 (50 dias).

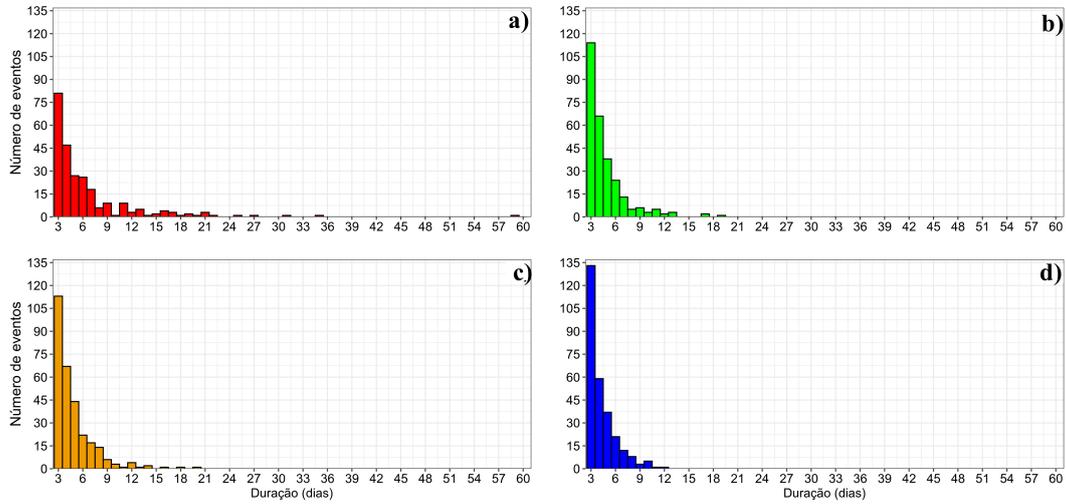
Figura 4.6 - Frequência anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

O histograma de duração é apresentado na Figura 4.7. No grupo 1, um total de 81 episódios apresentaram a duração mínima de 3 dias, que corresponde a 31,8% dos eventos totais; 47 eventos duração de 4 dias; e aproximadamente 25 eventos, durações de 5 e 6 dias. Ainda neste grupo, 40 episódios (15,7%) tiveram duração superior a 10 dias com destaque para os eventos com duração de 59 dias em 2015, 35 dias em 2010, 31 dias em 2016 e de 27 dias em 1998. No grupo 2, 114 eventos (40,7%) tiveram duração de 3 dias, 66 eventos de 4 dias e 38 de 5 dias. Neste grupo, foram observados 13 eventos com mais de 10 dias de duração, com o máximo de 19 dias observado em 2016 e 2 episódios com 17 dias de duração em 1971 e 1997. Referente ao grupo 3, 113 eventos (38,0%) apresentaram a duração de 3 dias, com valores acima de 35 episódios com durações de 4 e 5 dias, 11 eventos (3,7%) com duração maior que 10 dias, destacando os eventos registrados em 2015 (20 dias) e 1971 (18 dias). No grupo 4, um total de 113 eventos (47,5%) mostraram duração de 3 dias, com decréscimo linear nos dias posteriores até 8 dias, com apenas 2 eventos apresentando duração superior a 10 dias, de 12 em um episódio em 2014 e de 11 dias notado em 1963.

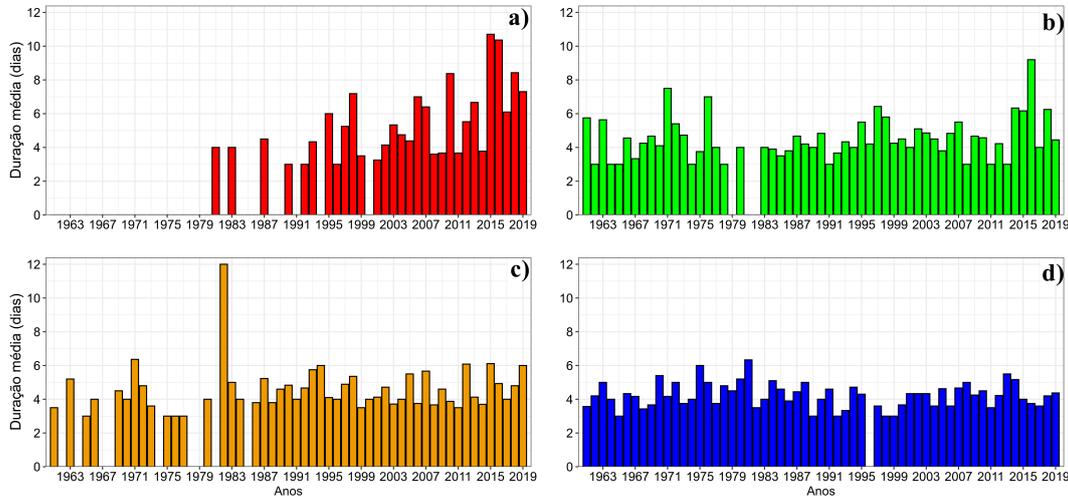
Figura 4.7 - Histograma da duração dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.8 apresenta a duração média anual dos eventos em cada grupo. A média foi de 5,37 dias para o grupo 1, 4,53 dias no grupo 2, 4,57 dias no grupo 3 e no grupo 4 foi 4,23 dias. De maneira geral, a duração dos episódios é semelhante no país, corroborando o resultado de Bitencourt et al. (2016). Valores médios superiores a 10 dias só foram notados nos grupos 1 e 3. No grupo 2 em 2016 se tem duração maior que 8 dias que ocorre pois como ser visto na Figura 4.8b, neste ano só teve a ocorrência de um único episódio que teve duração de 12 dias que pode ser visto na frequência apresentado na Figura 4.8b. Comparando os grupos é possível observar que no grupo 1 se tem a maior média e distribuição anual com maiores alterações, mostrando que na região tropical do Brasil, esperam-se episódios mais duradouros, quando comparado com o restante do país.

Figura 4.8 - Duração média anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.

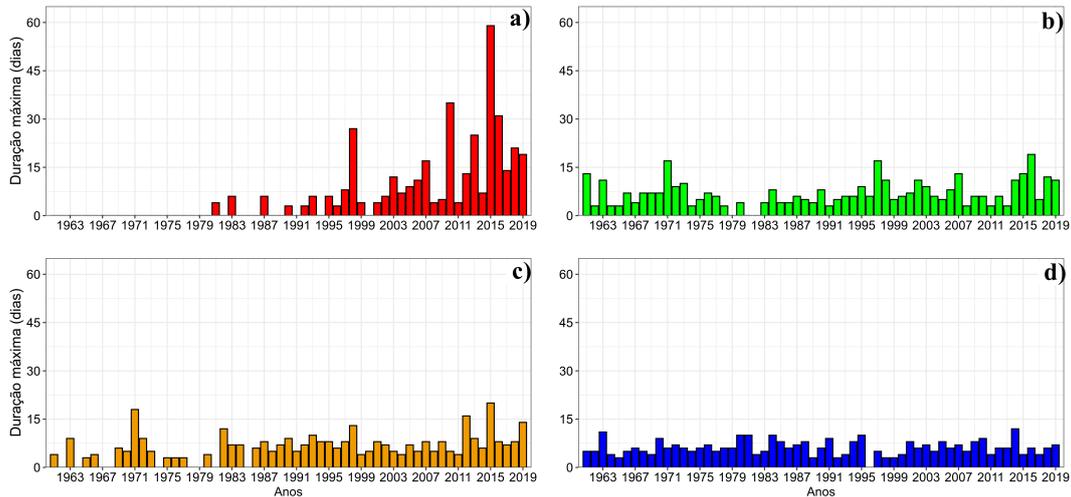


Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.9 apresenta a distribuição anual da duração máxima dos eventos de OC em cada grupo. No grupo 1 os episódios de maior duração ocorreram nos últimos 10 anos, em 2015 (59 dias), 2016 (31 dias) e 2010 (35 dias) indicando que eventos de OC com alta durabilidade na região deste grupo se destacam perante o restante do Brasil consistente com Bitencourt et al. (2020) que encontraram maior duração dos eventos de OC nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, o que pode ser visto na região deste grupo conforme os resultados apresentados. No grupo 2, notam-se oscilações de menores amplitudes do que as no grupo 1 com os máximos distribuídos no início, meio e final da série temporal, destacando 2016 com a duração máxima de 19 dias, assim como os anos de 1971 e 1997 com 17 dias e 1961, 2007 e 2015 com 13 dias. No grupo 3 ocorreu um máximo de 20 dias em 2015, que coincide com o evento de maior duração do grupo 1. Assim, mesmo que com magnitude inferior no grupo 3, pode indicar que os mecanismos meteorológicos responsáveis pela duração atípica notada neste ano apresentaram extensão espacial que cobriu as áreas destes dois grupos. No grupo 4, destacam-se os anos de 2014 e 1963. Em 1963, os grupos 2 e 3 também apresentaram duração máxima superior a 5 dias. Destaca-se ainda que no período de 2015-2016 não ocorreu um alto valor de duração máxima no grupo 4 como o notado nos demais grupos. Segundo Cai et al. (2020) durante a fase quente do ENOS ocorre um aumento na temperatura do ar em grande parte do Brasil, entretanto o inverso ocorre na porção Sul do país. Isso pode justificar essa ausência de um máximo na

duração dos eventos de OC no grupo 4.

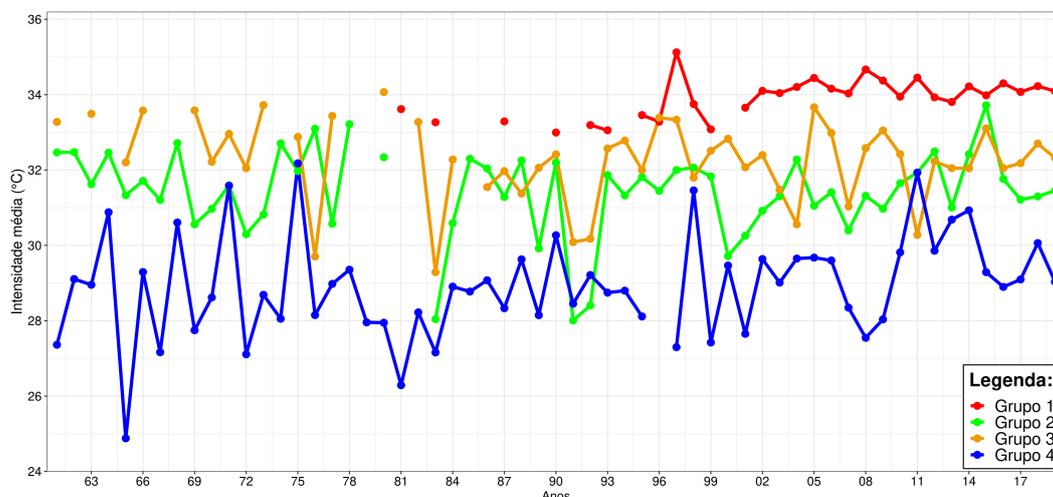
Figura 4.9 - Duração máxima anual dos eventos de OC. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

Em relação a intensidade média (Figura 4.10), no grupo 1 para todos os anos com OC a intensidade foi superior a  $32,0^{\circ}\text{C}$ , com destaque para 1997 com média de  $35,1^{\circ}\text{C}$ , o maior registro notado em todos os grupos durante os 59 anos analisados. Referente ao grupo 2, nota-se que a intensidade apresentou maior variabilidade do que a no grupo 1, com a maior intensidade em 2015 ( $33,7^{\circ}\text{C}$ ), e a menor intensidade de  $28,0^{\circ}\text{C}$  nos anos de 1983 e 1991. Para o grupo 3, assim como no grupo 2, alto valor de intensidade ocorreu em 2015 ( $33,1^{\circ}\text{C}$ ), entretanto a maior intensidade de  $34,1^{\circ}\text{C}$  ocorreu em 1980, e intensidade expressivas também em 1973 e 2005, enquanto que o mínimo de  $29,3^{\circ}\text{C}$  assim como no grupo 2 ocorreu em 1983. Por fim, o grupo 4 apresentou a maior variabilidade interanual entre todos os grupos, que pode estar associado com o fato de que na região deste grupo se tem o maior número de sistemas meteorológicos que aumentam a intensidade das OC (CERNE; VERA, 2011).

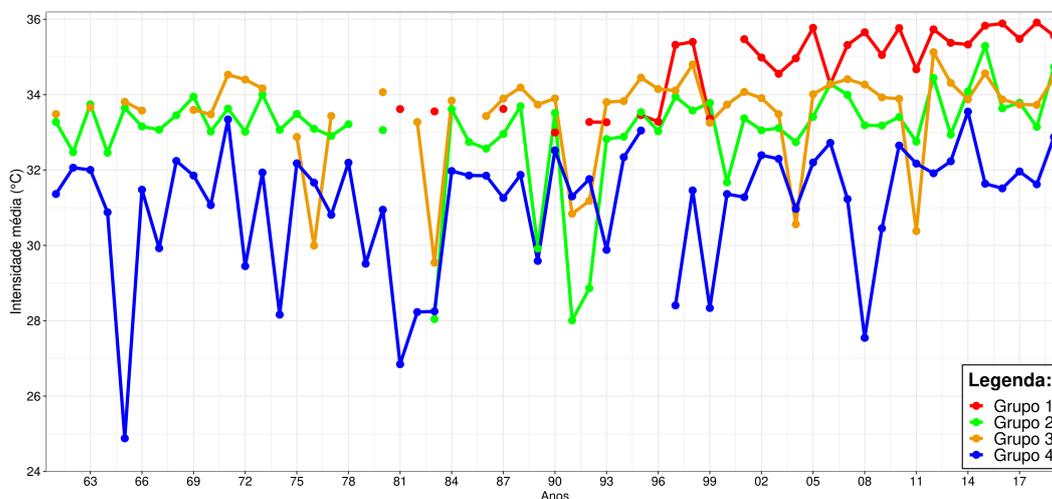
Figura 4.10 - Intensidade média anual dos eventos de OC para os grupos.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.11 é apresentada a intensidade máxima anual para os grupos. Para o grupo 1, é possível observar que mesmo que a intensidade média anual tenha ocorrido em 1997 Figura 4.10, a intensidade máxima apresenta os máximos na última década, de 36,0°C, 35,9°C e 35,8°C em 2018, 2015 e 2016, respectivamente, e o mínimo em 1990 (33,0°C). No grupo 2, assim como no grupo 1 os eventos que apresentaram a maior intensidade ocorreram na última década, com maiores valores em 2015 (35,3°C) e 2019 (34,7°C), variabilidade mais acentuada entre 1980 e 2000, e o mínimo de 28,0°C em 1983 e 1991. Para o grupo 3, destacam-se anos pela baixa intensidade quando comparado com anos próximos como 1983, 2004 e 2011, os máximos em 2012 (35,1°C) e 1998 (34,8°C) e o mínimo de 29,5°C em 1983 também visto no grupo 2. Referente ao grupo 4, assim como para a intensidade média, é notada expressiva variabilidade interanual durante toda a série temporal, com o máximo de 33,5°C em 2014, seguido de 33,3°C em 1971 e de 33,0°C em 1995 e os mínimos em 1965 (24,9°C) e em 1981 (26,8°C).

Figura 4.11 - Intensidade máxima anual dos eventos de OC para os grupos.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.2 são apresentados os testes de Mann-Kendall, Pettitt e de Sen aplicados para as características das OC. Para a ocorrência é observada tendência positiva com significância estatística nos grupos 1 e 3 que tiveram início antes do início do século XX. Para a frequência a tendência positiva é vista para os mesmos grupos da ocorrência, mas com alteração no ano de mudança no grupo 1. As durações médias e máximas também apresentaram tendência positiva para os grupos 1 e 3 com o ano de mudança sendo o mesmo que a frequência, mas no grupo 3 as mudanças ocorreram 4 anos antes da ocorrência e frequência. As magnitudes dessas tendências foram maiores no grupo 1 em todas as características citadas. Na intensidade média observaram-se tendências significativas nos grupos 1 e 4, com o início no grupo 4 posterior ao do grupo 1, com a mesma magnitude para ambos os grupos. Para a intensidade máxima notaram-se tendências significativas nos grupos 1 e 3, com o mesmo ano de mudança (1994) no grupo 1 notado nas demais características, indicando que nessa área os fatores relacionados ao início da tendência podem ter sido semelhantes, o que não foi notado nos demais grupos. A magnitude da tendência no grupo 1 foi muito superior ao observado do grupo 4, indicando que mesmo que se tenha um aumento nessas duas regiões ele será mais expressivo no grupo sobre a região tropical do país.

Tabela 4.2 - Testes de tendências aplicados nas características das OC para cada grupo analisado. Somente valores estatisticamente significativos ao nível de 5% são mostrados.

Característica	Grupo	Teste de mann-Kendall	Teste de Pettitt	Teste de Sen
Ocorrência ( $\eta$ )	Grupo 1	7,40	1991	0,17
	Grupo 3	4,75	1985	0,13
Frequência (dias)	Grupo 1	7,41	1994	0,68
	Grupo 3	4,69	1985	0,56
Duração média (dias)	Grupo 1	6,83	1994	0,13
	Grupo 3	3,06	1981	0,03
Duração máxima (dias)	Grupo 1	7,00	1994	0,22
	Grupo 3	3,64	1981	0,10
Intensidade média (°C)	Grupo 1	3,85	1994	0,02
	Grupo 3	2,22	2001	0,02
Intensidade máxima (°C)	Grupo 1	7,34	1994	0,40
	Grupo 3	3,56	1986	0,02

Fonte: Produção do autor.

#### 4.2.2 Ondas de frio

Na Tabela 4.3 são apresentadas as características estatísticas descritivas dos números de eventos de OF nos quatro grupos. O maior número de OF ocorreram nos grupos 2 e 4 que estão localizados na região subtropical, e o menor número de eventos foi registrado no grupo 1 que cobre a região tropical, indicando que a localização geográfica é importante na ocorrência dos episódios no país. O grupo 1 com o menor número de anos com OF difere dos demais grupos, principalmente do grupo 4 no qual em todos os anos ocorreu ao menos um evento. Em média, nos grupos 2, 3 e 4 ocorreram cerca de 5 eventos por ano, e no grupo 1, aproximadamente 3; o desvio-padrão indicou a maior variabilidade interanual nos grupos 1 e 3. O menor máximo anual ocorreu no grupo 1.

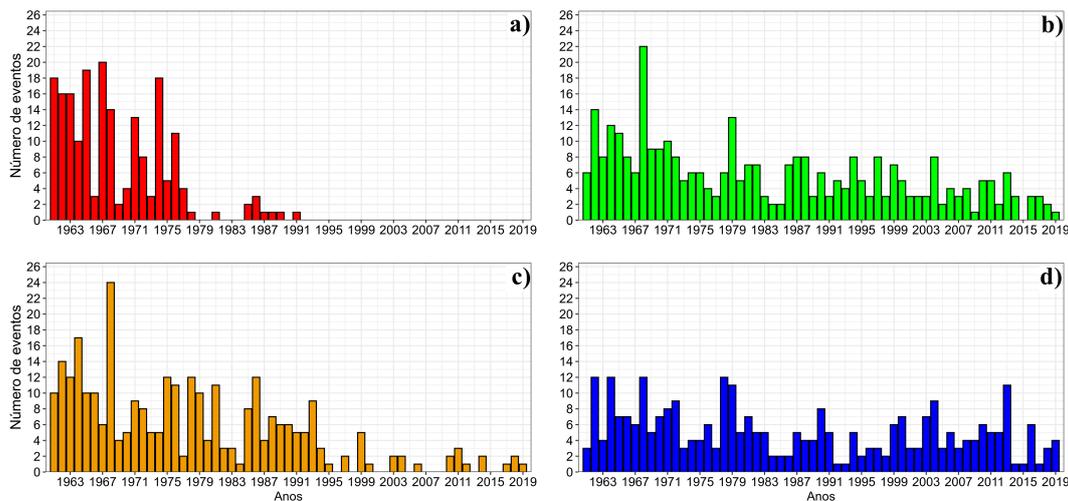
Tabela 4.3 - Características dos eventos de OF nos 4 grupos no período de 1961-2019.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Número de eventos	195	336	299	303
Número de anos com eventos (%)	25 (42,4%)	58 (98,3%)	48 (81,4%)	59 (100%)
Média anual	3,3	5,7	5,1	5,1
Desvio-padrão anual	5,9	3,7	5,1	3,0
Máximo anual	20	22	24	12

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.12 mostra a distribuição anual da ocorrência de OF por grupos. Anos com mais de 10 eventos ocorreram até 1975, a partir de quando se reduziram e não foram mais vistos a partir de 1992. Consistentemente, Smid et al. (2019) sugeriam que com as mudanças climáticas, espera-se uma redução no número de OF que pode ser expressiva ao ponto de extinguir os episódios de algumas regiões do planeta. No grupo 2, o comportamento temporal é diferente do notado no grupo anterior, destacando-se 2015 com ausência de OF, o que pode ter sido devido as altas temperaturas neste ano na região (NOBRE et al., 2016). Referente ao grupo 3, o máximo foi em 1967, bem como nos grupos 2 e 4, indicando para esse ano ocorrências de sistemas meteorológicos abrangentes que favoreceram OF nessas regiões. O grupo 4 caracterizou-se com mais de 8 episódios anuais depois de 2000, chamando atenção os picos em 2013 e 2016.

Figura 4.12 - Ocorrência anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.

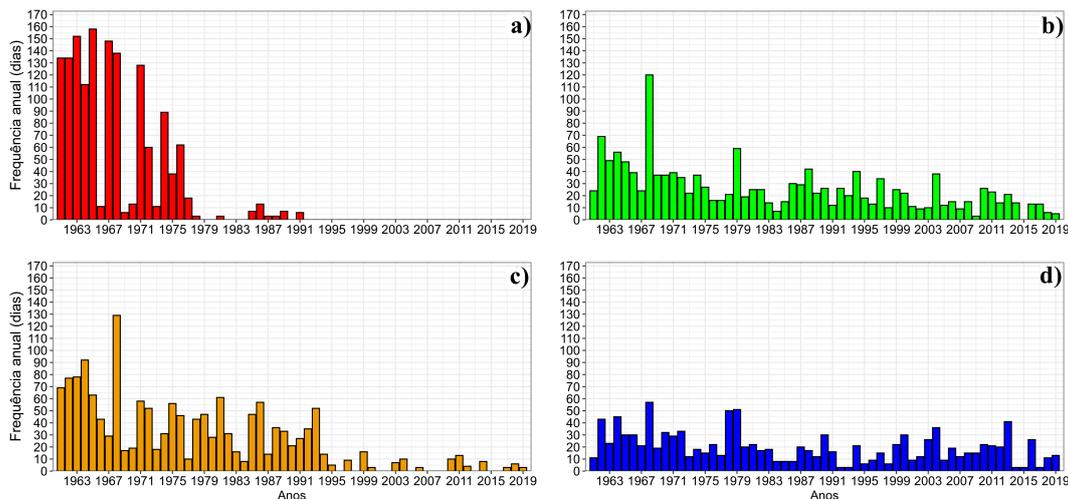


Fonte: Produção do autor.

A frequência anual é mostrada na Figura 4.13. No grupo 1, valores acima de 145 dias (mais de 38,0% do total de dias do ano) ocorreram nos anos de 1963, 1965 e 1967, e frequência tão expressiva não notada nos demais grupos. Referente ao grupo 2, destaca-se a elevada frequência de 120 dias em 1968 que é muito superior a notada no restante do período que não supera os 70 dias. Também no grupo 3, a frequência máxima de 129 dias ocorreu em 1968, seguido de 1964 com 92 dias. Também no

grupo 1, elevada frequência ocorreu em 1964. No grupo 4, a frequência máxima de 57 dias em 1968 foi a mais baixa entre os grupos, enquanto que em 1962, 1964, 1968 e 1978 mesmo que tenham ocorrido o mesmo número de 12 eventos (Figura 4.12) esses anos não apresentaram a mesma frequência.

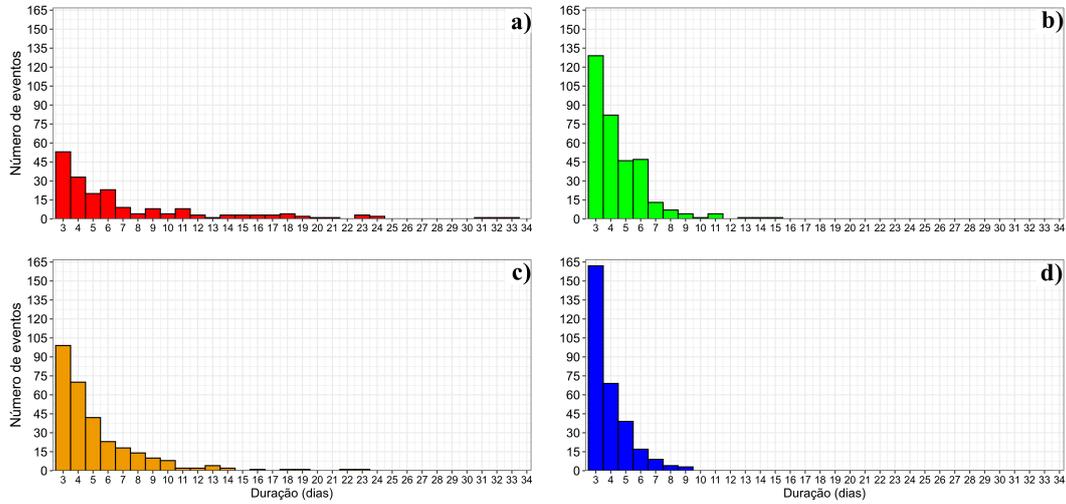
Figura 4.13 - Frequência anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.14 mostra os histogramas de duração das OF. No grupo 1 foram observados 53 (27,2%) episódios com duração de 3 dias, 33 (16,9%) de 4 dias, e um total de 41 (21,0%) eventos com duração superior a 10 dias, destacado o evento ocorrido entre 2 de fevereiro a 31 de março de 1968 com duração de 34 dias. Referente ao grupo 2, um total de 129 (38,4%) eventos apresentaram duração de 3 dias, 82 (24,4%) eventos de 4 dias e apenas 7 (2,1%) episódios com durabilidade maior que 10 dias, sendo o observado entre 9 a 23 de julho de 1989 o de maior duração de 15 dias. Para o grupo 3, 99 (33,1%) OF tiveram durabilidade de 3 dias, seguido de 70 (23,4%) de 4 dias, e foram 15 eventos com duração superior à 10 dias, com o máximo de 23 dias ocorrido entre 16 de abril a 5 de maio de 1972. No grupo 4, 162 (53,5%) dos eventos apresentaram duração de 3 dias, 69 (22,8%) de 4 dias, 39 (12,9%) de 5 dias, e nenhum episódio com duração maior que 10 dias.

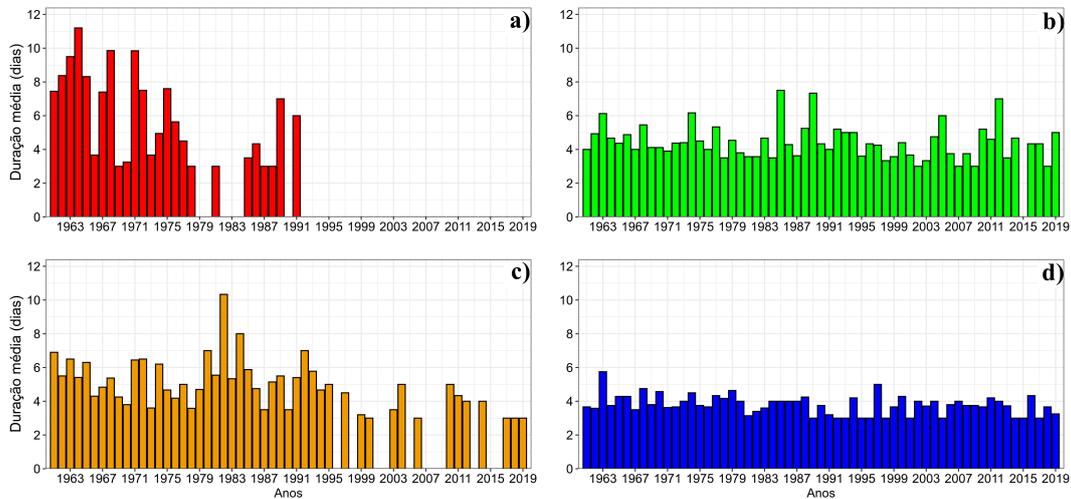
Figura 4.14 - Histograma da duração dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.15 apresenta a duração média anual. No grupo 1 foi observada a maior média de 11,2 dias, entre todos os grupos, em 1964, e médias superiores a 9 dias em 1963, 1968 e 1971. No grupo 2, a variabilidade interanual é diferente da dos demais grupos, com diversos anos apresentando média superior a 4 dias, com os maiores registros em 1985, 1989 e 2012 embora a ocorrência tenha sido maior em 1968 e 1979 (Figura 9). Referente ao grupo 3, diversos anos apresentaram médias elevadas, principalmente das décadas de 1980 e 1990, e após 1992 nenhum evento teve média maior que 6 dias. No grupo 4, variabilidade interanual é menor com o máximo em 1963 inferior a 6 dias, indicando episódios mais curtos nessa região.

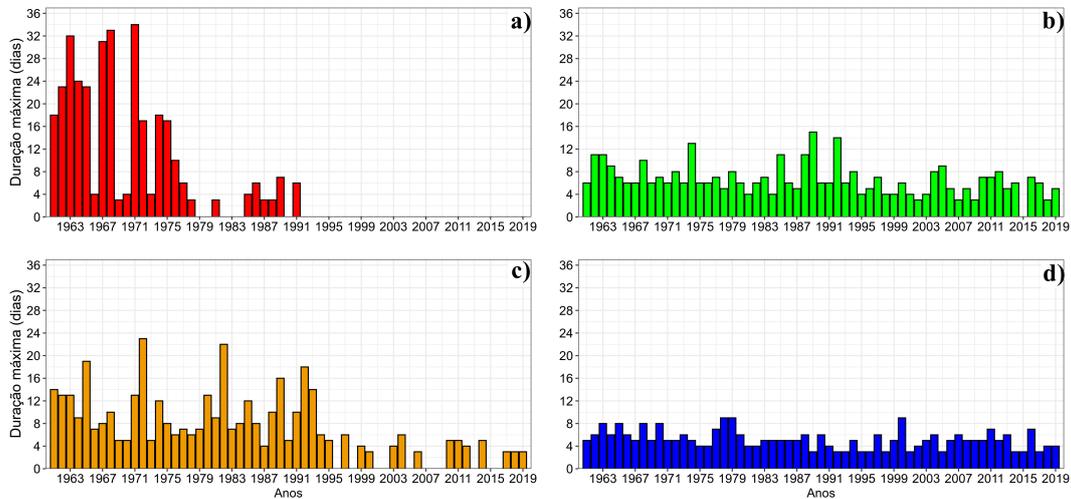
Figura 4.15 - Duração média anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

A distribuição anual da duração máxima é mostrada na Figura 4.16. No grupo 1, os maiores registros são concentrados nas duas primeiras décadas, e valores abaixo de 8 dias nos últimos anos com OF, apontando que mesmo antes do ano sem registrados das OF, sua durabilidade máxima já apresentava redução significativa. No grupo 2, nota-se baixa variabilidade interanual com poucos anos apresentando registros acima de 8 dias. Para o grupo 3, máximos acima de 10 dias ocorreram até meados de 1990, enquanto que no grupo 4, percebe-se a maior uniformidade entre os eventos de máxima duração durante todo o período analisado.

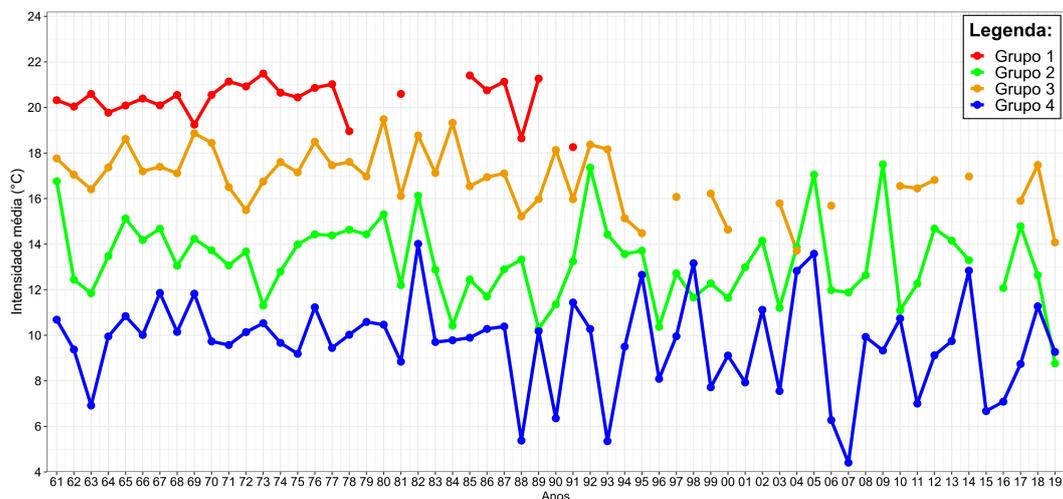
Figura 4.16 - Duração máxima anual dos eventos de OF. a) Grupo 1; b) Grupo 2; c) Grupo 3; d) Grupo 4.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.17 apresenta a distribuição anual da intensidade média das OF. No grupo 1, o valor é próximo de  $20^{\circ}\text{C}$  com o máximo de  $21,5^{\circ}\text{C}$  em 1973, e maiores intensidades em relação aos demais grupos, com exceção dos anos de 1978, 1988 e 1991 que apresentaram valores abaixo de  $19,0^{\circ}\text{C}$ . No grupo 2, os eventos apresentaram valores entre  $8^{\circ}\text{C}$  e  $18^{\circ}\text{C}$ , com o máximo de  $17,5^{\circ}\text{C}$  em 2009, seguido de 1992 com média de  $17,3^{\circ}\text{C}$ , enquanto que o mínimo de  $8,8^{\circ}\text{C}$  ocorreu em 2019. No grupo 3 também é notada expressiva variabilidade interanual, com o máximo ( $19,5^{\circ}\text{C}$ ) em 1980 e o mínimo de  $13,7^{\circ}\text{C}$  em 2004. No grupo 4, se tem as maiores oscilações durante todo o período, com picos expressivos em 1982, 1998, 2005 e 2014, e os mínimos inferiores à  $6^{\circ}\text{C}$  em 1988, 1993 e 2007. Destacando-se ainda que o grupo 4 foi o único grupo que apresentou OF em 2015 com intensidade média de  $6,7^{\circ}\text{C}$ .

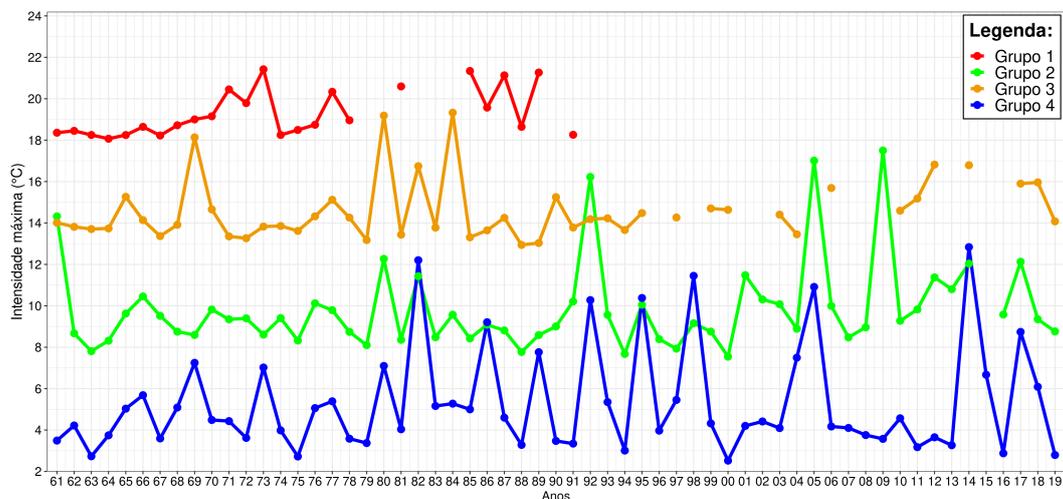
Figura 4.17 - Intensidade média anual dos eventos de OF para os grupos.



Fonte: Produção do autor.

A intensidade máxima anual é apresentada na Figura 4.18. O grupo 1 foi a única região que apresentou valores acima de 20°C, com os máximos em 1973 (21,4°C), 1985 (21,3°C) e 1989 (21,2°C). O grupo 2 apresentou expressiva variabilidade interanual com os máximos de 17,5°C e 17,0°C em 2009 e 2005, respectivamente, e os mínimos em 2000 e 1994. Para o grupo 3, os dois maiores valores ocorreram na década de 1980, com destaque também para 1969 e 2012. No grupo 4, a maioria dos anos apresentaram menores máximos do que os dos demais grupos, e alta variabilidade interanual destacando-se 2014 e 1982 com intensidades de 12,8°C e 12,2°C, respectivamente.

Figura 4.18 - Intensidade máxima anual dos eventos de OF para os grupos.



Fonte: Produção do autor.

Testes de tendência foram aplicados às características dos eventos de OF (Tabela 4.4). Em todos os grupos a ocorrência e frequência mostraram tendências negativas com significância estatística, com início em diferentes anos, com a maior magnitude no grupo 3 e a menor, no grupo 4. Referente a duração média, com exceção do grupo 2 os demais grupos apresentam tendências negativas estatisticamente significativas, que tiveram início entre as décadas de 1980 e 1990. A duração máxima também apresentou redução nas últimas décadas em todos os grupos, tendo início no mesmo ano nos grupos 2 e 3, com as maiores magnitudes nos grupos 1 e 3. Na intensidade média somente os grupos 1 e 3 mostraram tendências significativas, enquanto que na intensidade máxima, a tendência foi significativa somente no grupo 1.

Tabela 4.4 - Testes de tendências aplicados nas características das OF para cada grupo. Somente valores estatisticamente significativos ao nível de 5% são mostrados. Características dos eventos de OF nos 4 grupos no período de 1961-2019.

Característica	Grupo	Teste de Mann-Kendall	Teste de Pettitt	Teste de Sen
Ocorrência ( $\eta$ )	Grupo 1	-6,98	1978	-0,08
	Grupo 2	-5,13	1982	-0,12
	Grupo 3	-6,38	1993	-0,19
	Grupo 4	-2,61	1983	-0,05
Frequência (dias)	Grupo 1	-6,92	1978	-0,29
	Grupo 2	-5,54	1994	-0,54
	Grupo 3	-6,66	1993	-1,10
	Grupo 4	-2,86	1981	-0,24
Duração média (dias)	Grupo 1	-6,53	1991	-0,11
	Grupo 3	-5,04	1995	-0,07
	Grupo 4	-2,21	1988	-0,01
Duração máxima	Grupo 1	-6,57	1991	-0,13
	Grupo 2	-3,07	1994	-0,05
	Grupo 3	-5,52	1994	-0,18
	Grupo 4	-2,65	1980	-0,02
Intensidade média ( $^{\circ}\text{C}$ )	Grupo 1	-5,22	1989	-0,17
	Grupo 3	-4,68	1993	-0,07
Intensidade máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	Grupo 1	-4,79	1989	-0,13

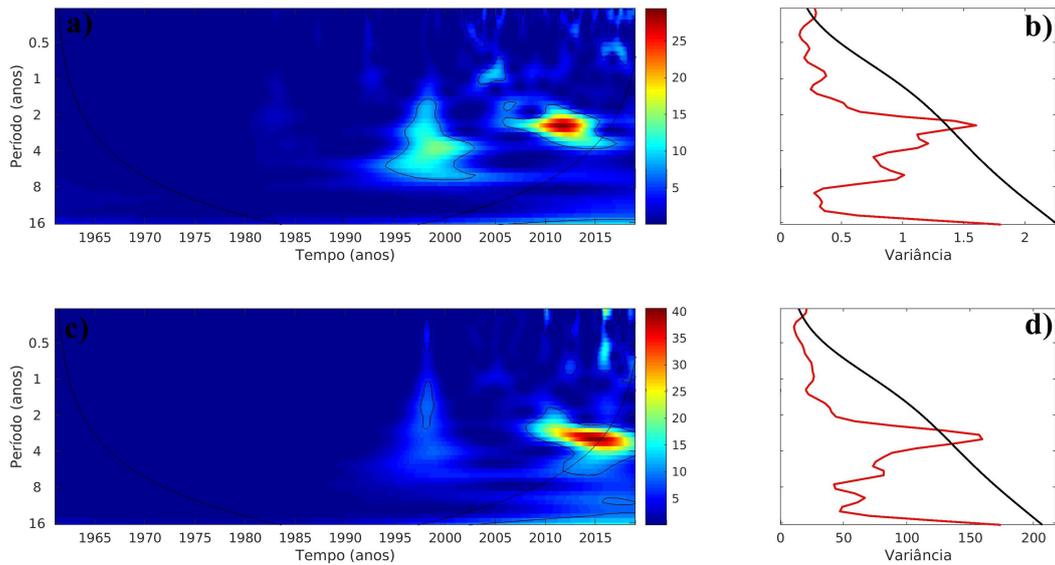
Fonte: Produção do autor.

### 4.3 Associação com o El Niño Oscilação Sul

#### 4.3.1 Ondas de calor

O espectro local de energia da TO para a ocorrência das OC no grupo 1 (Figura 4.19a) aponta localmente energia estatisticamente significativa entre 1995 e 2005 na escala entre 2 e 8 anos, em 2005 na escala de 1 ano e entre 2005 e 2018 para a escala entre 2 e 4 anos, com o período de máxima energia entre 2011 e 2013. O espectro global de ondeleta dessa característica (Figura 4.19b) mostra um pico com significância estatística na escala de 3 anos. O espectro local para a frequência (Figura 4.19c) aponta regiões energéticas no ano de 1998 em escala sazonal e entre 1 e 3 anos, com a presença de alta energia também no período de 2010 a 2019 em diferentes escalas principalmente em 2015, com o máximo entre 2010 e 2018 na escala entre 3 e 5 anos. O espectro global dessa característica (Figura 4.19d) é semelhante ao notado na ocorrência com pico significativo entre 3 e 4 anos.

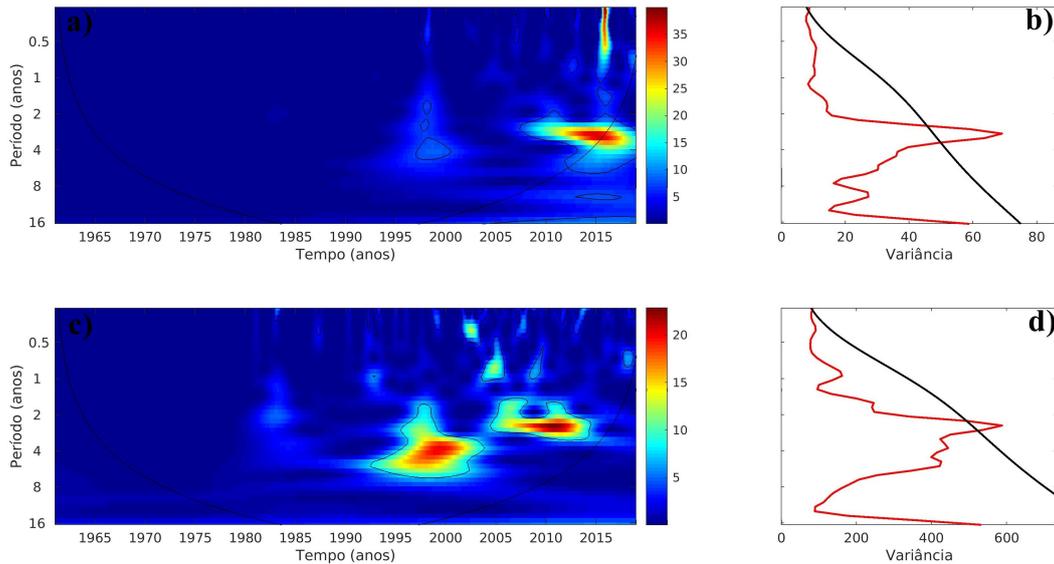
Figura 4.19 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

O espectro local para a duração média das OC (Figura 4.20a) mostra assim como na frequência, regiões significativas em 1998, e também semelhanças no período de 2008 a 2019, com expressiva quantidade de energia em 2015 em diversas escalas, principalmente entre 2 e 8 anos. O espectro global dessa característica (Figura 4.20b) apresenta pico significativo na escala de 4 anos, assim como na ocorrência e frequência. Referente ao espectro local da intensidade média (Figura 4.20c) notam-se diversas regiões significativas destacando o período de 1990 a 2005 na escala entre 2 e 8 anos. O espectro global da intensidade (Figura 4.20d) também aponta apenas um pico estatisticamente significativo na escala de 3 anos, como nas demais características para este grupo.

Figura 4.20 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as características das OC do grupo 1 para as 3 fases do ENOS para cada trimestre. Para o verão o maior número de eventos ocorreu durante o EN, enquanto que o mínimo, na LN. O mesmo foi notado para a frequência e a duração média com diferença expressiva entre as duas fases do ENOS, a exceção foi na intensidade média com o máximo na fase neutra e sem diferenças expressivas entre as fases extremas. No outono não foram identificados eventos durante a LN, o maior número de episódios durante a neutralidade, e a maior frequência e duração média e valores próximos de intensidade média durante EN. Para o inverno, os máximos para as quatro características ocorreram durante a neutralidade com baixo número de eventos nas demais fases. Na primavera, o máximo de eventos foi na neutralidade, os máximos de frequência e de duração média ocorreram durante o EN, enquanto que a intensidade média foi maior na LN.

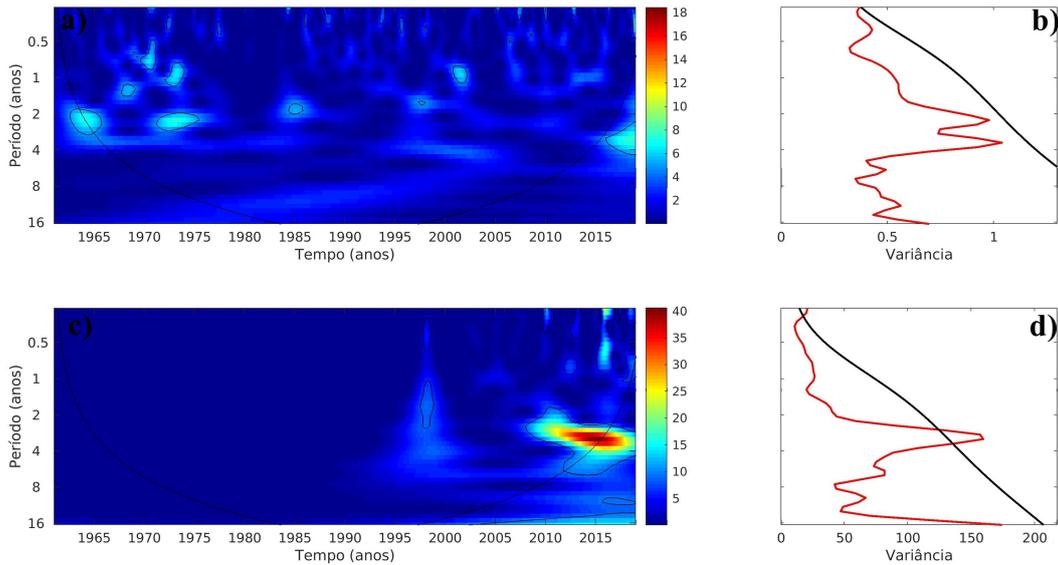
Tabela 4.5 - Características trimestrais das ondas de calor do grupo 1 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	33	27	8	18
	Neutro	21	34	42	26
	LN	14	0	13	19
Frequência (dias)	EN	240	229	44	196
	Neutro	114	203	298	117
	LN	65	0	71	107
Duração média (dias)	EN	7,75	7,24	4,33	9,10
	Neutro	4,89	5,23	5,99	4,24
	LN	4,12	-	5,47	5,33
Intensidade média (°C)	EN	33,92	33,3	33,3	35,19
	Neutro	34,10	33,2	33,5	35,32
	LN	33,78	-	33,2	35,34

Fonte: Produção do autor.

Na [Figura 4.21a](#) é apresentado o espectro local da ocorrência das OC do grupo 2. Em diferentes períodos tem regiões significativas na escala de 1 ano, assim como para a escala de 2 a 4 anos com o sinal mais pronunciado no período de 2016 a 2019 que fica fora do cone de influência. No espectro global ([Figura 4.21b](#)), nenhuma escala de tempo mostrou significância estatística. Para o espectro local da frequência ([Figura 4.21c](#)) o sinal é semelhante ao observado para essa característica no grupo 1 ([Figura 4.19c](#)), com sinais em 1998 e alta energia entre as escalas de 2 a 8 anos na última década. O espectro global para a frequência mostra pico significativo na escala de 4 anos ([Figura 4.21d](#)).

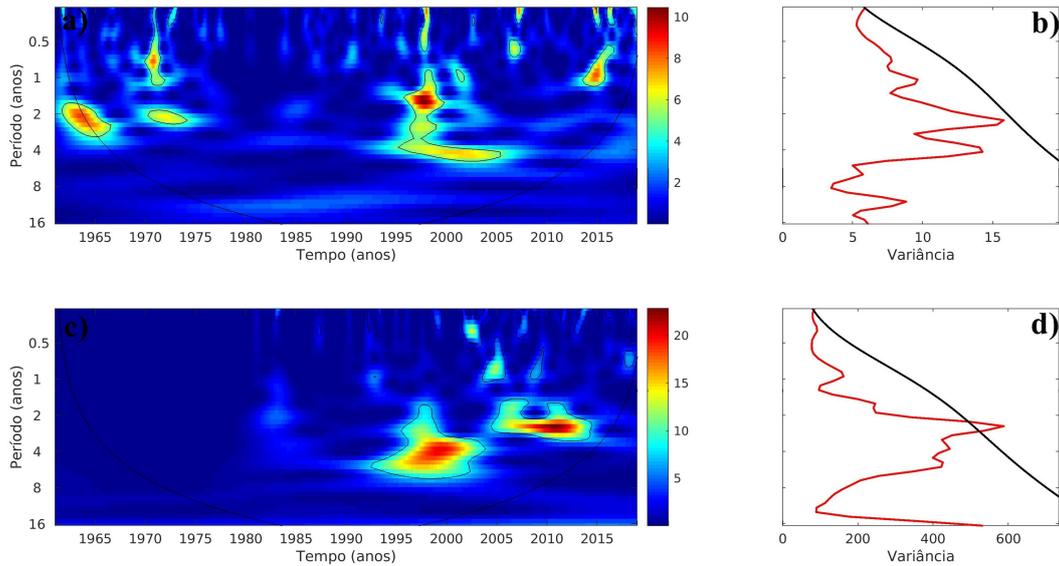
Figura 4.21 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 2. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

O espectro local para a duração média no grupo 2 (Figura 4.22a) aponta regiões energéticas com significância estatística para diversas escalas de tempo durante todo o período de análise, sendo maior para a escala de 2 entre 1962-1966, 1973-1975 e 1998-1998, com uma expressiva região entre 1995 a 2005 na escala de 4 anos, entretanto no espectro global (Figura 4.22b) nenhuma escala aponta significância estatística. O espectro local da intensidade média desse grupo é apresentado na Figura 4.22c, na qual observam-se duas regiões expressivas após 1990, a primeira entre 1992 e 2003 nas escalas de 2 a 8 anos, e a outra se estende de 2005 a 2014 na escala de 1 a 3 anos, com a maior energia na faixa de 2 anos para o período de 2008 a 2013. O espectro global dessa característica (Figura 4.22d) aponta significância estatística na escala de 2 anos.

Figura 4.22 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

As características das OC no grupo para as três fases do ENOS são apresentadas na Tabela 4.6. No verão, não foram notadas diferenças entre as fases do ENOS em todas as características. No outono a ocorrência e frequência apresentaram máximos na neutralidade enquanto a duração média foi maior no EN e intensidade média na LN. O mesmo comportamento foi observado no inverno sendo a intensidade média a exceção com o EN apresentando o maior registro. Na primavera, todas as características têm os maiores valores na neutralidade seguido do EN e mínimos na LN.

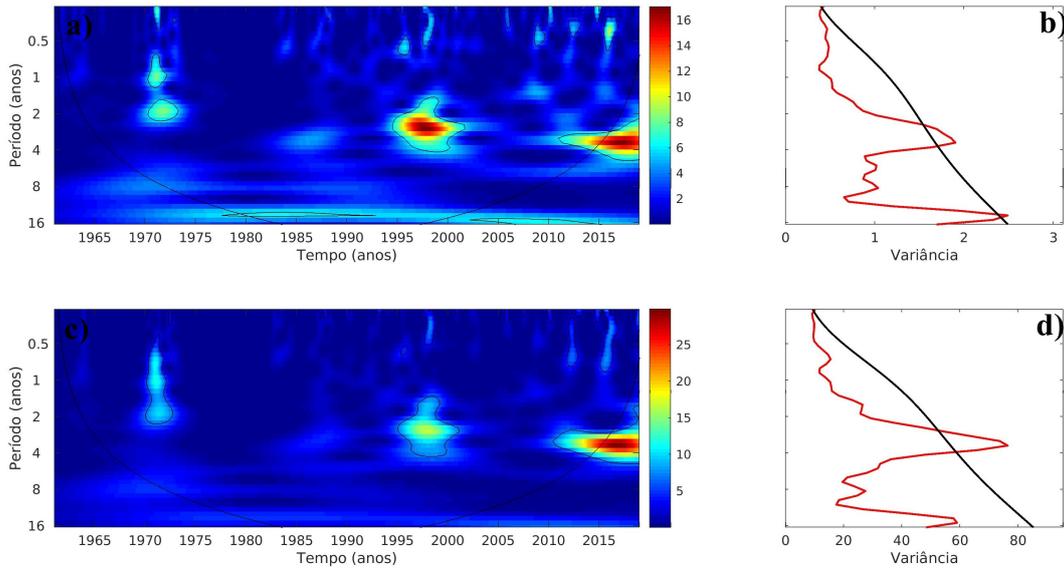
Tabela 4.6 - Características trimestrais das ondas de calor do grupo 2 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	27	15	15	27
	Neutro	21	51	39	32
	LN	22	6	16	11
Frequência (dias)	EN	156	74	77	124
	Neutro	114	236	164	145
	LN	106	25	60	45
Duração média (dias)	EN	5,74	5,33	4,98	4,31
	Neutro	5,76	4,64	4,03	4,43
	LN	4,88	4,40	3,66	3,89
Intensidade média (°C)	EN	33,2	30,58	29,3	32,68
	Neutro	32,7	30,80	29,2	32,88
	LN	33,1	31,26	28,9	32,64

Fonte: Produção do autor.

O espectro local da ocorrência de OC no grupo 3 (Figura 4.23a) mostra regiões significativas em torno de 1970 em diferentes escalas, entre 1998 e 2003 na escala de 2 a 4 anos e para o período de 2011 a 2019 na escala de 4 anos, destacando também a escala de 15 que apresenta significância nos períodos de 1978-1993 e 2002-2015. O espectro global dessa característica (Figura 4.23b) aponta significância nas escalas de 4 e 15 anos. O espectro local da frequência (Figura 4.23c) aponta similaridades ao mostrado na Figura 4.23A. Na Figura 4.23d o espectro global dessa característica mostra sinal estatisticamente significativo na escala de 4 anos.

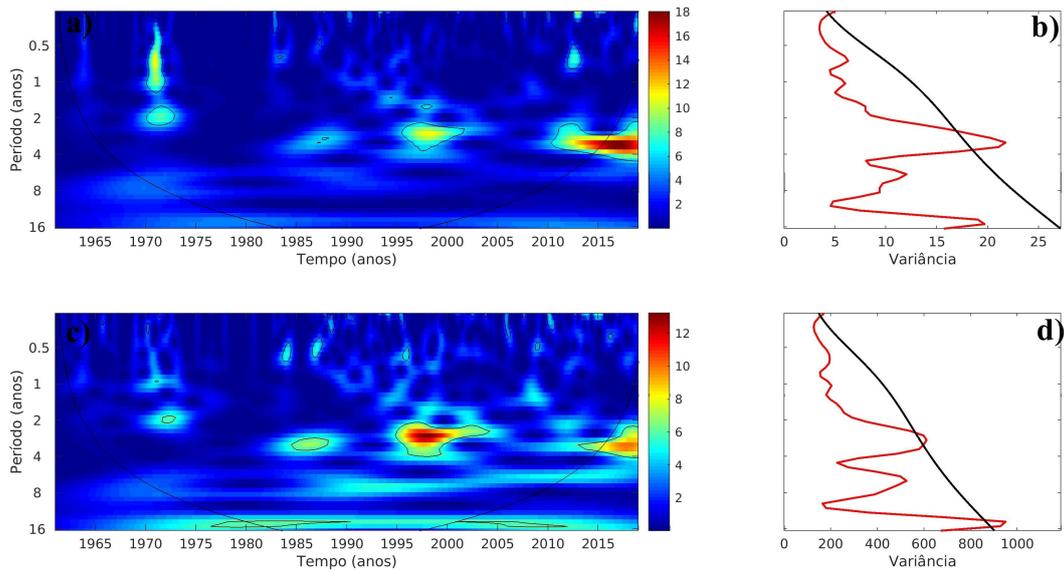
Figura 4.23 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.24a é apresentado o espectro local da duração média no grupo 3. Existem similaridades deste gráfico com os das características apresentadas acima para este grupo. O período de 2010 a 2019 apresentou a maior energia, e o espectro global (Figura 4.24b) mostra um pico significativo na escala de 4 anos assim como na frequência. O espectro local da intensidade média (Figura 4.24c) apresenta semelhanças com o da ocorrência, principalmente no expressivo sinal notado na escala de 15 anos, com maior quantidade energética entre 1996 e 2000 na escala de 2 a 4 anos. O espectro global dessa característica (Figura 4.24d) também aponta significância estatística nas escalas de 4 e 15 anos, assim como na frequência (Figura 4.23d).

Figura 4.24 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.7 mostra que no grupo 3 durante o verão a ocorrência das OC foi maior no EN, a frequência na neutralidade foi 4 dias superior a de anos de EN, enquanto que a duração e intensidade média foram maiores durante a LN com a intensidade apresentando baixa variação entre as fases. Para as demais estações, a ocorrência foi superior na neutralidade, o máximo de frequência no outono e inverno na neutralidade, na primavera o máximo de frequência ocorreu em anos de EN, enquanto que a duração média foi maior nessas 3 estações no EN, e a intensidade média foi maior na LN no outono e em anos de EN foi maior no inverno e na primavera.

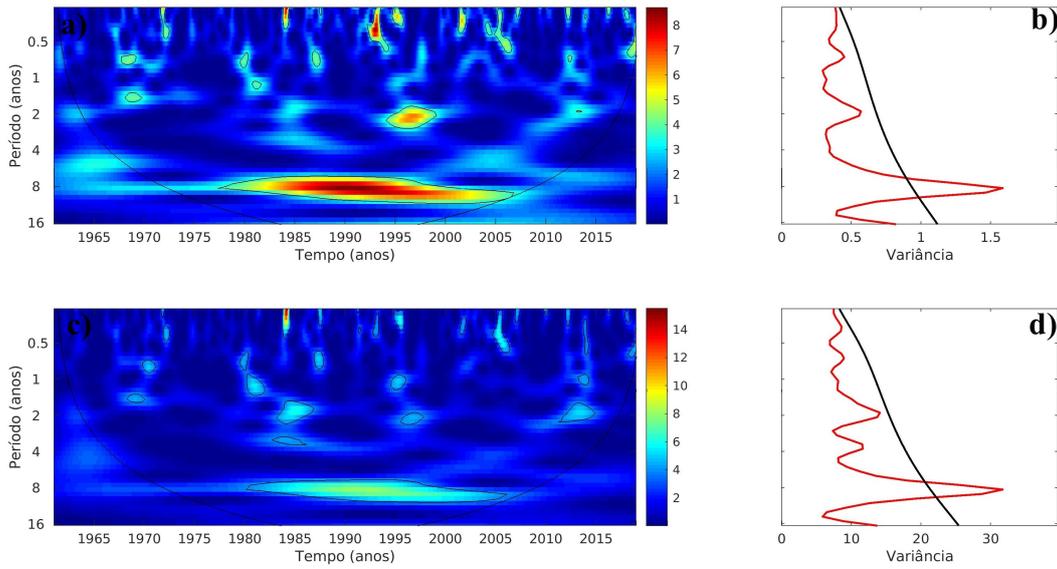
Tabela 4.7 - Características trimestrais das ondas de calor do grupo 3 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	27	26	13	32
	Neutro	26	43	43	33
	LN	19	12	12	11
Frequência (dias)	EN	129	156	65	177
	Neutro	133	194	186	137
	LN	110	48	49	44
Duração média (dias)	EN	4,64	6,02	4,65	5,68
	Neutro	5,06	4,68	4,35	4,07
	LN	6,08	3,60	4,07	4,17
Intensidade média (°C)	EN	33,8	32,0	30,1	33,27
	Neutro	33,7	32,2	30,0	33,18
	LN	33,9	32,6	29,9	32,84

Fonte: Produção do autor.

Na [Figura 4.25a](#) é apresentado o espectro local para a ocorrência no grupo 4. Ocorreram, regiões estatísticas significativas em diversas escalas de tempo, chamando atenção o período de 1995 a 1998 na escala de 2 a 3 anos, e de 1978 a 2006 na escala entre 6 e 10 anos com expressiva quantidade de energia entre 1985 e 2000. O espectro global dessa característica ([Figura 4.25b](#)) aponta significância estatística para um pico de 8 anos. Para a frequência ([Figura 4.25c](#)) as áreas significativas são similares ao observado na ocorrência, principalmente no período de 1980 a 2005 na mesma escala de tempo que no espectro da ocorrência. O espectro global para a frequência ([Figura 4.24d](#)) também aponta um pico significante em 8 anos.

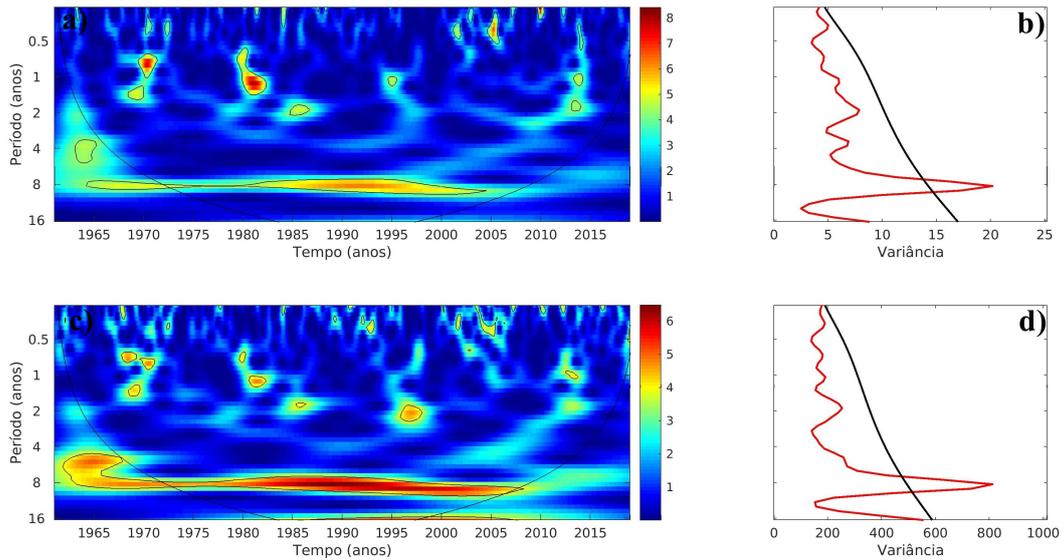
Figura 4.25 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OC no grupo 4. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.26a o espectro local da duração média aponta similaridades com o observado na ocorrência e frequência. Há uma região expressiva entre 1965 e 2005 com significância durante todo este período na escala de 6-10 anos. Significância estatística da variância ocorreu na escala de 1-2 anos em 1970, 1980, 1995 e 2014. O espectro global dessa característica (Figura 4.26b) apresenta um pico significativo em 8 anos. O espectro local da intensidade média (Figura 4.25c) é similar ao notado na duração média com realce ao sinal na escala de 6 a 10 anos, sinal esse que é intensificado no período de 1985 a 2000. Em relação ao espectro global (Figura 4.26d), é identificado um pico significativo em 8 anos, assim como na ocorrência, frequência e duração média. Essa concordância na escala significativa no espectro global nas quatro características não foi vista em nenhum outro grupo.

Figura 4.26 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OC no grupo 4. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.8, no verão a ocorrência foi maior na LN, e nas demais estações é nessa fase do ENOS que se notam os mínimos, e os máximos na neutralidade sendo o mesmo observado na frequência. A duração média é maior no EN durante o verão e primavera, com o mínimo na LN no verão, inverno e primavera, enquanto a intensidade apresenta baixa variabilidade em todas as estações, destacando no verão o mesmo registro de  $31,7^{\circ}\text{C}$  nas fases de neutralidade e LN .

Tabela 4.8 - Características trimestrais das OC do grupo 4 para as fases do ENOS.

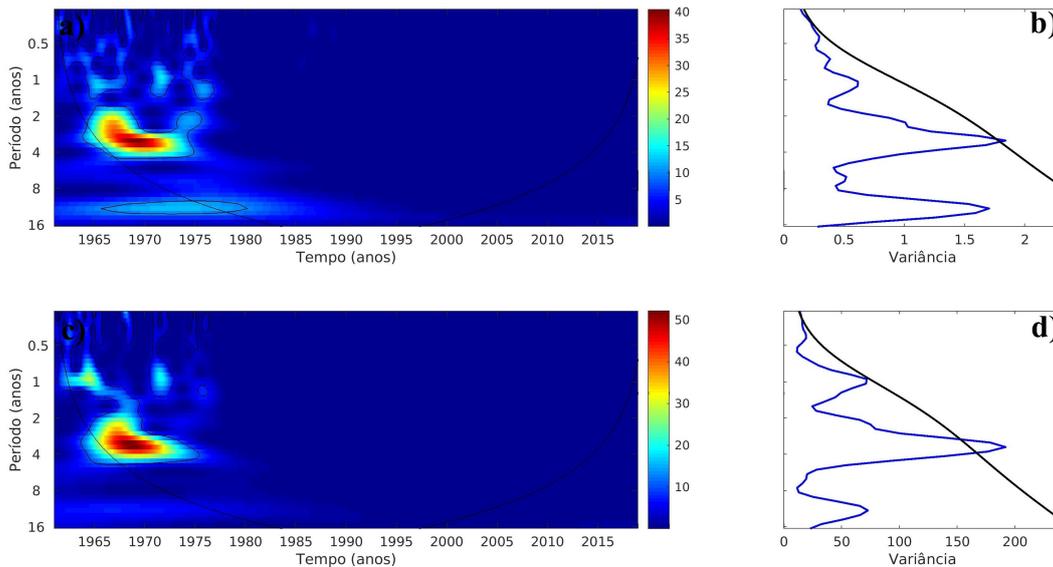
<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	19	7	17	21
	Neutro	23	3	9	12
	LN	24	3	9	12
Frequência (dias)	EN	87	26	69	85
	Neutro	104	291	227	105
	LN	109	11	34	46
Duração média (dias)	EN	4,58	3,58	3,80	4,24
	Neutro	4,35	4,69	4,12	3,81
	LN	4,25	3,67	3,92	3,75
Intensidade média (°C)	EN	31,9	28,9	26,4	29,66
	Neutro	31,7	28,8	26,0	33,18
	LN	31,7	28,8	26,3	28,78

Fonte: Produção do autor.

### 4.3.2 Ondas de frio

Na [Figura 4.27](#) é apresentado o espectro local da ocorrência de OF no grupo 1. Ocorreram diversas regiões estatisticamente significativas para diferentes escalas de tempo, destacando o período de 1965 a 1975 que possui alta energia na escala entre 2 e 4 anos. O espectro global ([Figura 4.27b](#)) dessa característica mostra um pico significativo em 3 anos. Referente ao espectro local da frequência ([Figura 4.27c](#)), nota-se similaridade ao da ocorrência principalmente no período de 1965-1975, entretanto o espectro global ([Figura 4.27d](#)) da frequência apresentou um pico na escala de 4 anos.

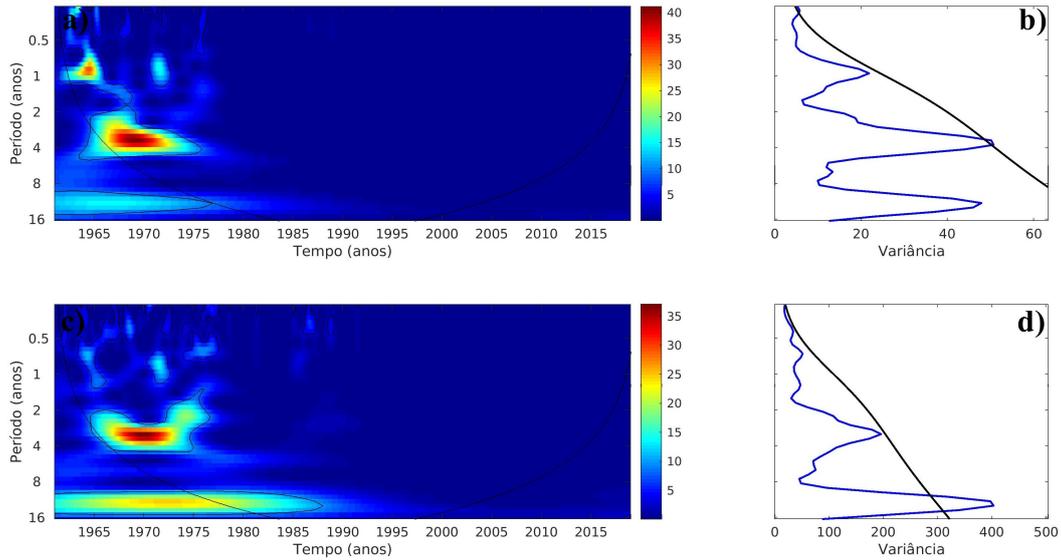
Figura 4.27 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

O espectro local da duração média no grupo 1 (Figura 4.28a) aponta a mesma região altamente energética no período de 1965 a 1975 notada na ocorrência e frequência, destacando a região estatisticamente significativa a escala de 10 a 14 anos entre 1961 e 1976, que não foi vista nas características anteriormente apresentadas. O espectro global (Figura 4.28b) indica pico significativo em 4 anos. O espectro local da intensidade média (Figura 4.28c) mostra períodos consistentes aos dos espectros da ocorrência, frequência e duração média, destacando o período de 1961 a 1987 que apresenta alta energia similar ao notado na duração média mas estendendo-se em mais de uma década. O espectro global da intensidade média (Figura 4.28d) mostra um pico significativo entre 12 e 14 anos, que foi notado apenas nessa característica.

Figura 4.28 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 1. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.9 é notável que as OF no grupo 1 o maior número de eventos durante o verão foi registrado na LN e os menores registros no EN, o inverso do observado nas OC (Tabela 4.5). A intensidade também apresentou essa diferença entre as fases opostas, enquanto que a duração média foi maior durante a neutralidade e maior intensidade média no EN. No outono e inverno os mínimos de ocorrência e frequência ocorreram no EN e os máximos na neutralidade; o máximo da duração média superior a 7°C ocorreu na neutralidade e valores inferiores à 4°C nas demais fases; como no verão a intensidade foi maior durante o EN. Na primavera, o máximo da ocorrência foi notado na neutralidade e o mesmo número de eventos no EN e LN e a frequência mostrou baixa diferença entre fases; a duração média apresentou máximo na neutralidade enquanto e a intensidade média foi maior durante a LN.

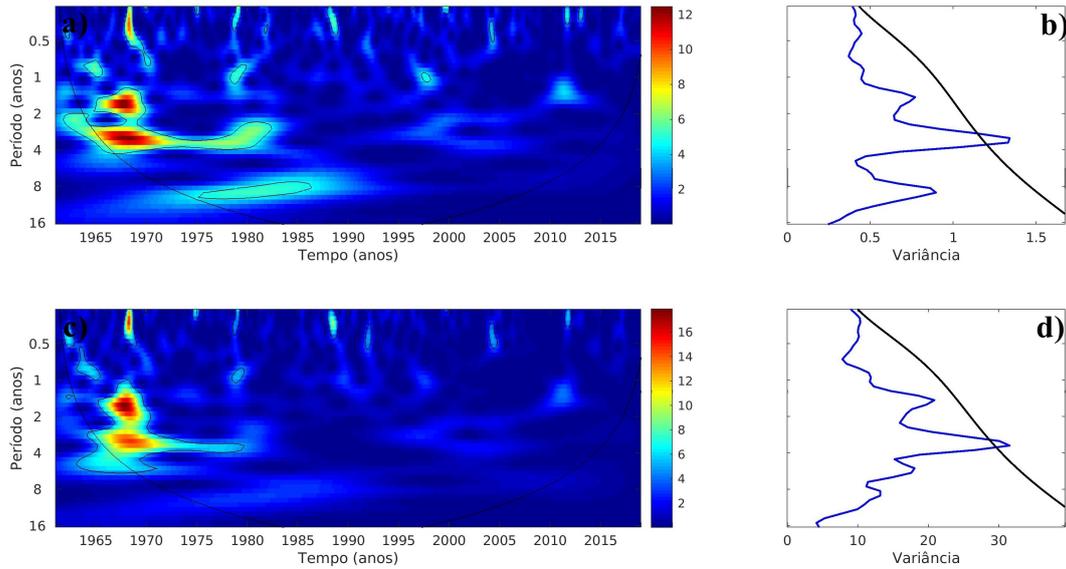
Tabela 4.9 - Características trimestrais das ondas de frio do grupo 1 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	5	3	12	11
	Neutro	17	44	31	23
	LN	23	8	7	11
Frequência (dias)	EN	20	11	106	60
	Neutro	161	376	191	175
	LN	190	38	63	66
Duração média (dias)	EN	4,08	3,50	8,17	5,25
	Neutro	8,98	7,32	4,94	6,69
	LN	7,43	3,93	6,56	5,70
Intensidade média (°C)	EN	21,36	21,20	18,96	20,86
	Neutro	21,27	20,69	18,88	21,08
	LN	21,26	20,72	18,72	21,25

Fonte: Produção do autor.

A [Figura 4.29a](#) mostra o espectro local da ocorrência de OF no grupo 2. Notam-se regiões significativas na escala de 2 a 4 anos entre 1963 a 1983 com maior energia no período de 1965 a 1970, assim como entre 1975 e 1985 na escala de 8 anos, com o espectro global ([Figura 4.29b](#)) mostrando um pico significativo em torno de 3 anos. No espectro local da frequência ([Figura 4.29b](#)) nota-se significância estatística na escala de 1 a 6 anos no período de 1965 a 1970 com uma extensão até 1980 deste sinal na escala de 3 anos. O espectro global da frequência ([Figura 4.29d](#)) mostra um pico significativo também em 3 anos.

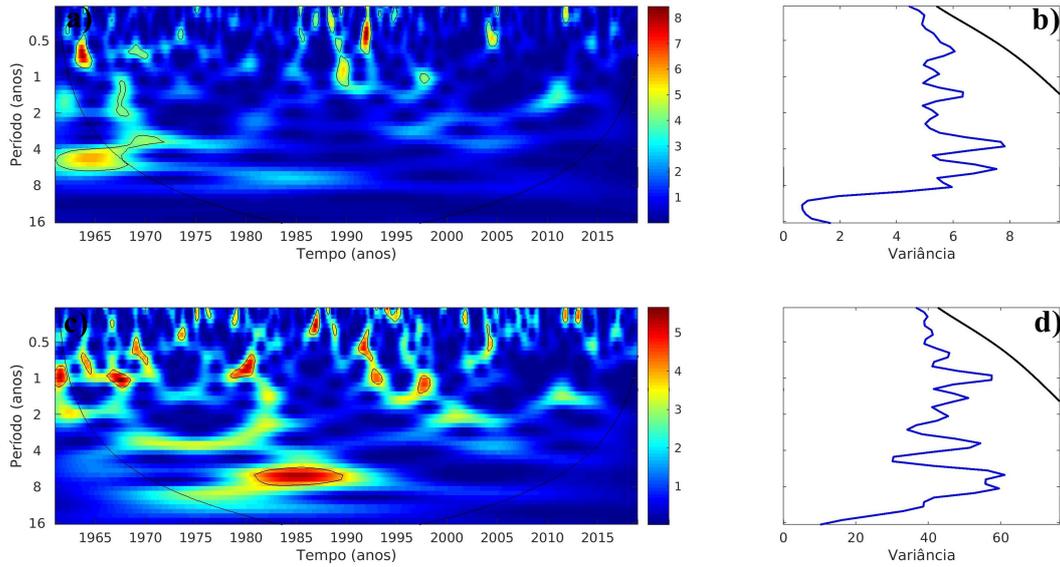
Figura 4.29 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 2. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

O espectro local da duração média (Figura 4.30a) mostra durante grande parte do período áreas significativas na escala de 1 ano, assim como no período de 1961 a 1970 na escala de 4 a 6 anos. O espectro local da intensidade média (Figura 4.30c) apresenta essas regiões na escala de 1 ano, mostrando uma alta energia entre 1982 e 1990 na escala de 6 a 8 anos. Entretanto, nos espectros globais dessas características (Figura 4.30b-d) não ocorre nenhum pico significativo.

Figura 4.30 - A) e C) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 2. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; B) e D) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.10 são apresentadas as características das OF para as fases do ENOS. Em todas as estações, com exceção da primavera, as maiores ocorrências e frequência foram durante a neutralidade. A duração média no verão foi maior no EN e no outono e inverno na neutralidade, e vice-versa para a intensidade média. A duração e intensidade média na primavera foram maiores durante a LN.

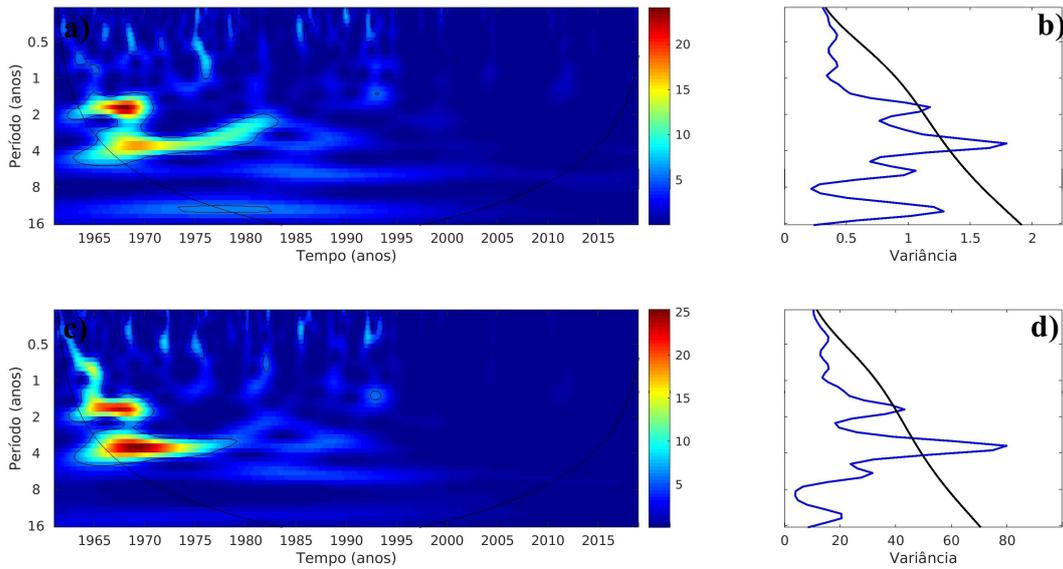
Tabela 4.10 - Características trimestrais das ondas de frio do grupo 2 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	24	12	15	18
	Neutro	44	63	45	31
	LN	18	11	21	34
Frequência (dias)	EN	113	46	66	70
	Neutro	202	304	221	130
	LN	73	40	91	150
Duração média (dias)	EN	4,70	3,69	4,42	3,86
	Neutro	4,33	4,80	5,03	4,15
	LN	4,32	3,69	4,24	4,28
Intensidade média (°C)	EN	17,05	15,16	9,59	13,07
	Neutro	17,28	13,49	9,39	13,13
	LN	17,02	11,58	9,07	13,56

Fonte: Produção do autor.

O espectro local da ocorrência de OF no grupo 3 (Figura 4.31a) mostra significância estatística entre 1962 e 1982 para as escalas de 1 a 6 anos e na escala de 12 anos entre 1973 e 1983. O espectro global (Figura 4.31b) aponta significância estatística entre 2 e 4 anos. O espectro local da frequência (Figura 4.31c) mostra similaridades ao da ocorrência com energia significativa principalmente na escala de 4 anos. No entanto, o sinal cobre o período de 1962 a 1980 e também não são vistos sinais significativos para escala superior a 6 anos. O espectro global da frequência (Figura 4.31d) indica as mesmas escalas significativas observadas na ocorrência.

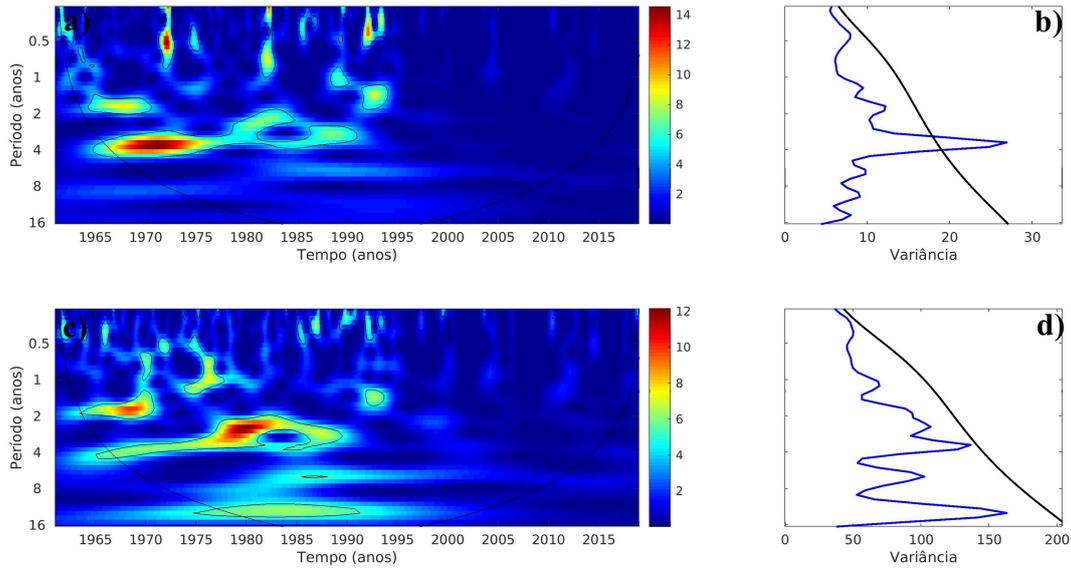
Figura 4.31 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

O espectro local da duração média (Figura 4.32a) mostra significância estatística na escala de 2 a 4 anos entre 1965 e 1991 com maior energia entre 1965 e 1975 e no espectro global (Figura 4.32b) um pico significativo na escala de 4 anos. O espectro local da intensidade média (Figura 4.32c) mostra sinal significativo na escala de 2 anos no período de 1965 a 1970, assim como para a escala de 4 anos entre 1965 e 1990, na escala de 14 anos entre 1975 e 1990. Entretanto, no espectro global (Figura 4.32d) nenhuma escala de tempo apresenta sinal com significância estatística.

Figura 4.32 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.11 as características das OF no grupo 3 mostram que todos os trimestres maiores ocorrências e frequência foram durante a neutralidade e menores no EN, e baixa ocorrência durante a LN. No verão, a duração média foi maior no EN e nos demais trimestres na neutralidade, e a intensidade média teve seu máximo durante o EN em todos os trimestres.

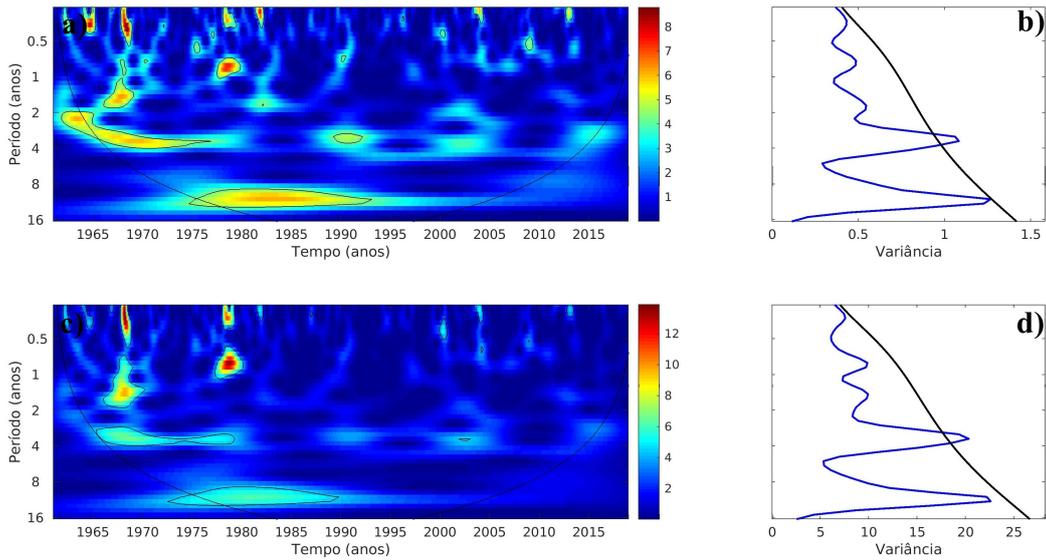
Tabela 4.11 - Características trimestrais das ondas de frio do grupo 3 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	15	9	14	18
	Neutro	39	60	44	32
	LN	17	11	15	25
Frequência (dias)	EN	78	33	68	78
	Neutro	189	357	254	164
	LN	83	49	70	134
Duração média (dias)	EN	5,91	3,80	4,67	4,19
	Neutro	4,71	6,06	5,92	5,12
	LN	4,66	4,07	4,56	4,91
Intensidade média (°C)	EN	19,49	19,10	14,30	17,39
	Neutro	19,45	17,49	14,11	17,10
	LN	19,18	15,68	14,14	17,37

Fonte: Produção do autor.

Na [Figura 4.33a](#) é apresentado o espectro local da ocorrência de OF no grupo 4. Significância estatística ocorreram na escala de 2 a 4 anos entre 1961 e 1977, assim como em 1990 e na escala de 8 a 14 anos entre 1975 e 1992. O espectro global ([Figura 4.33b](#)) apresentou um pico com significância estatística em 4 anos. Para o espectro local da frequência ([Figura 4.33c](#)) são notados sinais significativos na escala de 1 ano nas décadas de 1960 e 1980, e como observado na ocorrência para as escalas de 4 e 14 anos. O espectro global da frequência ([Figura 4.33d](#)) mostra um pico significativo em 4 anos.

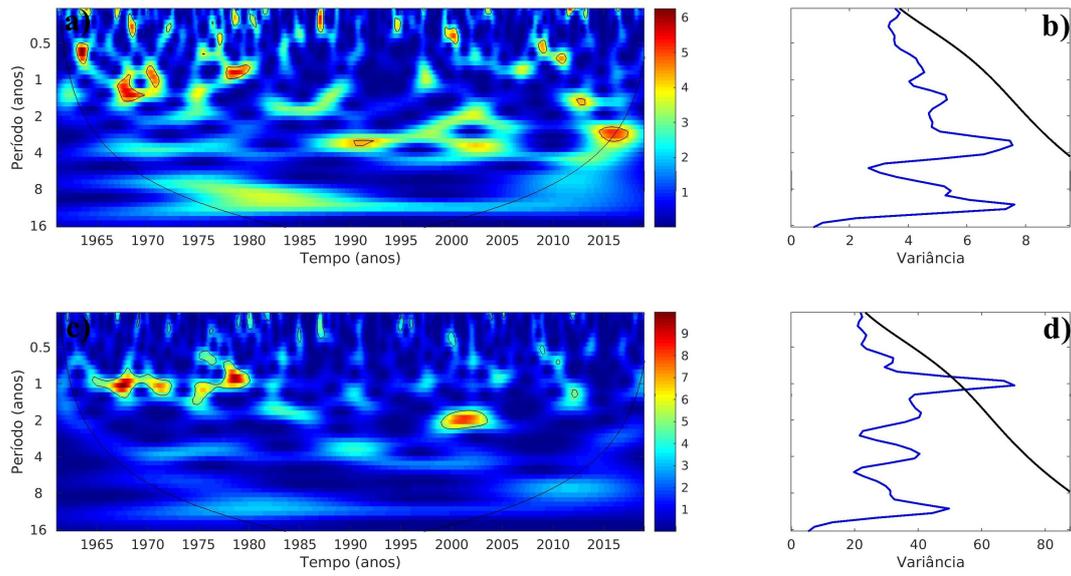
Figura 4.33 - a) e c) Espectros de energia local da ocorrência e frequência, respectivamente, das OF no grupo 3. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da ocorrência e frequência, respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

No espectro local da duração média de OF neste grupo (Figura 4.34a) notam-se áreas isoladas significativas durante todo o período analisado, destacando os sinais na escala de 1 ano e em 2015 na escala de 3 anos. Entretanto, no espectro global (Figura 4.34b) em nenhuma escala de tempo é notada significância estatística. O espectro local da intensidade média (Figura 4.34c) mostra sinais significativos até a escala de 2 anos, com predominância de 1-2 anos nas primeiras décadas, com o espectro global (Figura 4.34d) mostrando um pico significativo em torno de 1 ano.

Figura 4.34 - a) e c) Espectros de energia local da duração e intensidade, respectivamente, das OF no grupo 4. Contornos em preto correspondem a variâncias significativas ao nível de 95%. A curva no formato de cone representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) e d) Espectro global de ondeleta da duração e intensidade respectivamente, a linha preta indica que o espectro de ondeleta global é significativo ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 4.12 em todos os trimestres a ocorrência e frequência foram maiores na neutralidade, enquanto que a duração média foi maior no outono e primavera durante a LN e no inverno durante o EN. A intensidade média apresentou máximo no verão, outono e inverno durante EN enquanto que na primavera, durante a LN.

Tabela 4.12 - Características trimestrais das OFs do grupo 4 para as fases do ENOS.

<b>Característica</b>	<b>Fase</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
Ocorrência (número de eventos)	EN	21	7	9	14
	Neutro	39	64	41	34
	LN	24	6	16	28
Frequência (dias)	EN	75	31	36	58
	Neutro	158	268	159	113
	LN	89	25	66	103
Duração média (dias)	EN	3,48	4,43	3,92	4,20
	Neutro	4,13	3,96	3,89	3,36
	LN	3,80	4,12	4,13	3,58
Intensidade média (°C)	EN	14,61	11,30	4,42	9,11
	Neutro	14,42	10,0	4,33	8,52
	LN	14,32	9,80	4,17	9,40

Fonte: Produção do autor.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo determinar as principais características dos episódios de ondas de calor e de frio (OC e OF) no Brasil utilizando dados diários de temperatura do ar de estações meteorológicas convencionais através de técnicas estatísticas.

Foi realizada a regionalização da temperatura compensada do ar em áreas homogêneas usando análise de agrupamento, abordagem que ainda não havia sido aplicada no país como um todo. Foi apresentada a divisão entre 2 e 5 grupos. De maneira geral, os grupos se distinguem pelas características climatológicas que são determinadas pelos sistemas meteorológicos atuantes em cada área, com baixa variabilidade térmica na região tropical e maior em grupos localizados na porção subtropical do Brasil. A escolha do número ideal de grupos costuma ser subjetiva, mas pode ser auxiliada por métodos objetivos, como o usado no presente trabalho, que foi o índice de Silhouette. Dentre as divisões propostas o maior valor do índice foi para 2 grupos. Entretanto, devido a extensão espacial do país e diversidade de sistemas atmosféricos atuantes, notou-se que esse número de grupos não seria suficiente para expressar a variabilidade térmica no Brasil. Assim, 4 seria o número ideal de grupos, uma vez que essa divisão foi a que apresentou o maior valor do índice de Silhouette após 2 grupos. Nesta subdivisão, grupo 1 é o que apresenta maior extensão territorial, compreendendo a região Norte e grande parte do Nordeste e Centro-Oeste; o segundo grupo cobre a maioria do Sudeste e parte dos estados do Mato Grosso do Sul e Paraná; grupo 3 localiza-se entre os grupos 1 e 2, e o grupo 4 representa a região Sul do Brasil. Nessa divisão a formação dos grupos, os grupos se distinguem pelas condições térmicas e tipologia climática de cada área e foi considerada suficiente para estudos posteriores.

Posteriormente foi apresentada a caracterização espaço-temporal da ocorrência, frequência, duração média, duração máxima, intensidade média e intensidade máxima dos eventos de OC e OF registrados no país para o período de 1961 a 2019, para as regiões homogêneas definidas. Vale destacar que como as séries temporais de temperatura máxima e mínima são obtidas a partir da média em cada grupo, em particular no grupo 1, tais séries são mais representativas das áreas com maior disponibilidade de dados. Assim, os resultados para regiões com baixa disponibilidade de dados no grupo 1 devem ser tomados com cautela. Para as OC foram registrados elevados números de episódios nos grupos 3 e 2 e menor no grupo 1. Dentre os 59 anos analisados, episódios de OC nos grupos 2, 3 e 4 ocorreram em mais de

50 anos, com o grupo 4 sem ocorrência de OC apenas em 1996, enquanto que no grupo 1 episódios de OC ocorreram em apenas 30 anos com o primeiro registro em 1981. A ocorrência e frequência mostraram expressiva variabilidade interanual, principalmente nos grupos que cobrem a porção tropical do país enquanto a menor variabilidade foi notada no grupo 4, o que pode estar associada com o fato que os mecanismos atmosféricos associados a gênese dos eventos nos grupos 1 e 4 são diferentes, com contribuição direta da ZCIT no grupo 1 enquanto que a ZCAS e os sistemas frontais são os principais sistemas no grupo 4. A análise da duração demonstrou que em todas as regiões os eventos com duração entre 3-4 dias foram predominantes, e eventos com duração superior a 20 dias foram notados apenas nos grupos 1 com um registro de 59 dias em 2015. Referente a intensidade, expressiva variabilidade foi notada principalmente no grupo 4; e no grupo 1, picos em anos de El Niño (EN), que foi mais expressivo em 1998, sugerindo que neste grupo o ENOS pode influenciar na intensidade dos eventos. Análises de tendência das características das OC mostraram tendências positivas significativas de todas as características no grupo 1, na maioria delas no grupo 3, na intensidade média no grupo 4; e em nenhuma característica no grupo 2. Portanto, os eventos de OC tendem a ser mais frequentes, duradouros e intensos na região tropical do Brasil, o que corrobora a literatura.

Referente às OF, a ocorrência foi maior nos grupos 2 e 4 com mais de 300 episódios. No grupo 1 o último evento registrado ocorreu em 1991, enquanto que nos demais grupos as OF ocorreram durante todo o período analisado, destacando o grupo 4 com eventos em todos os anos, com os máximos notados entre as décadas de 1960 e 1970 em todos os grupos. Esse resultado corrobora a literatura sobre a tendência de diminuição do número de OF a partir do século XX. Referente a duração, como para as OC, episódios com duração de 3 a 5 dias foram frequentes e eventos com duração superior a 15 dias notados apenas nos grupos 1 e 3, enquanto que o grupo 4 apresentou o máximo de duração de 9 dias. Assim como para as OC, foi notada expressiva variabilidade interanual da intensidade dos eventos, sendo essa maior nos grupos 2 e 4 devido sua relação com os sistemas frontais. Referente à análise de tendência, foi notada tendência negativa em todas as características no grupo 1 devido ao último registro ter sido na década de 1990, com os demais grupos mostrando também tendência negativa significativa na ocorrência, frequência, duração média e máxima, enquanto que para a duração média somente os grupos 1 e 3 apresentaram sinal significativo. Assim, os eventos de OF estão diminuindo em todo o país, diminuição essa mais acentuada na porção tropical realçando o contraste entre os extremos de temperatura estudados.

A análise das relações do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e eventos de OC e OF, considerando as características de ocorrência, frequência, duração média e intensidade para o período de 1961 a 2019 foi feita empregando a análise de ondeletas e comparando as características em cada fase do ENOS. Para as OC, a transformada em ondeletas mostrou sinais significativos principalmente na escala de 4 anos na maioria das características para os diferentes grupos. As escalas significativas nos espectros globais das ondeletas apresentou concordância com o período de recorrência do ENOS, com sinais no espectro local em anos de extremos de ENOS como 1998, 2008 e 2015. A divisão das características por fase ENOS mostrou que durante o verão, no grupo 1 se tem maior ocorrência durante o El Niño (EN) e menor durante a Lã Niña (LN). O inverso foi notado no grupo 4 com o máximo durante a LN e o mínimo durante EN que concorda com o impacto que essas fases do ENOS exercem na temperatura do ar no país, sendo associado também com alterações no regime de precipitação deste modo de variabilidade. Os resultados mostraram que ENOS tem impactos nas OC, mais evidente no verão para a ocorrência e frequência.

Referente às OF, os sinais ocorreram nas escalas de 4 anos e também na de 8 anos, com a primeira escala podendo estar associada com o ENOS principalmente com as áreas significativas no espectro local, enquanto a segunda escala indica a presença da influência de modos de variabilidade interdecenal. No grupo 2 nenhuma escala de tempo mostrou significância. A divisão por fase também mostrou essa associação principalmente no grupo 1 durante o verão que apresentou o maior número de eventos durante a LN e o mínimo no EN. Isso concorda com os impactos do ENOS nessa região do país, que ocasionam aumentos nos acumulados de precipitação e diminuição na temperatura do ar que podem favorecer eventos de OF. Diferente do observado nas OC, o contraste com o grupo 4 não foi notado, nem influência direta do ENOS nos demais grupos considerando os métodos utilizados.

### **5.1 Sugestões de trabalhos futuros**

- Comparar os resultados da regionalização obtida a partir de dados observacionais com produtos de reanálise;
- Averiguar as características da atmosfera para de eventos de OC/OF que ocorreram simultaneamente nas diversas regiões homogêneas;
- Utilizar de campos meteorológicos para prover uma compreensão dos mecanismos atmosféricos associados aos eventos de OC e OF;
- Averiguar a associação dos eventos de OC com episódios de seca, uma

vez que os resultados mostraram que em anos de seca expressiva se tem aumento de eventos;

- Avaliar os impactos que a tendência de aumento das OC e de redução nas OF podem acarretar na saúde humana e no conforto térmico;
- Estudar diretamente a associação do ENOS com os eventos de OC/OF durante o verão no Brasil, uma vez que durante essa estação a associação foi mais expressiva;
- Gerar campos meteorológicos dos dias em OC/OF em cada fase do ENOS e avaliar como esse modo de variabilidade influencia a gênese e intensificação dos eventos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMADI, F.; TAHROUDI, M. N.; MIRABBASI, R.; KHALILI, K.; JHAJHARIA, D. Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. **Meteorological Applications**, v. 25, n. 2, p. 314–321, 2018. [41](#)
- ALEXANDER, L. V.; UOTILA, P.; NICHOLLS, N. Influence of sea surface temperature variability on global temperature and precipitation extremes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. 18, 2009. [23](#)
- ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; STAPE, J. L. Modeling monthly meteorological and agronomic frost days, based on minimum air temperature, in center-southern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 134, n. 1, p. 177–191, 2018. [46](#)
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. d. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. [41](#)
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, n. 3, p. 407–427, 2013. [39](#)
- ALVES, M. P. A.; SILVEIRA, R. B.; BITENCOURT, D. P.; FRANKE, A. E. Onda de frio? análise de diferentes métodos de identificação. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017. [13](#)
- ANDERSON, B. G.; BELL, M. L. Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States. **Epidemiology (Cambridge, Mass.)**, v. 20, n. 2, p. 205, 2009. [6](#)
- AÑEL, J. A.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, M.; LABANDEIRA, X.; LÓPEZ-OTERO, X.; TORRE, L. De la. Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector. **Atmosphere**, v. 8, n. 11, p. 209, 2017. [1](#), [5](#), [9](#), [14](#)
- ARAÚJO, G. R. G. de; SANTOS, C. M.; SILVA, A. G. da. Avaliação das parametrizações cumulos emanuel e grell do modelo climático regional regcm4: simulando a precipitação e temperatura a superfície sobre o nordeste brasileiro durante o outono austral. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 231–240, 2019. [39](#), [46](#)

- ARBLASTER, J. M.; ALEXANDER, L. V. The impact of the El Niño-southern oscillation on maximum temperature extremes. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 20, 2012. 23
- ASHOK, K.; BEHERA, S. K.; RAO, S. A.; WENG, H.; YAMAGATA, T. El Niño modoki and its possible teleconnection. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 112, n. C11, 2007. 16
- ASHOK, K.; YAMAGATA, T. The El Niño with a difference. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 481–484, 2009. 3, 17
- BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; FRANKE, A. E.; SILVEIRA, R. B.; ALVES, M. P. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 4, p. 2464–2478, 2020. 2, 3, 14, 29, 30, 34, 51
- BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; MAIA, P. A.; AMORIM, F. T. Frequência, duração, abrangência espacial e intensidadedas ondas de calor no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 506–517, 2016. 1, 4, 6, 23, 47, 50
- BOLZAN, M. J. A. Transformada em ondeleta: uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, p. 563–567, 2006. 36
- BRÖNNIMANN, S. Impact of El Niño–southern oscillation on european climate. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 3, 2007. 3
- CAESAR, J.; ALEXANDER, L.; TREWIN, B.; TSE-RING, K.; SORANY, L.; VUNIYAYAWA, V.; KEOSAVANG, N.; SHIMANA, A.; HTAY, M.; KARMACHARYA. Changes in temperature and precipitation extremes over the indo-pacific region from 1971 to 2005. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 6, p. 791–801, 2011. 15
- CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCETTO, A. S.; GARREAUD, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y.-G.; SANTOSO, A. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020. 3, 16, 21, 22, 51
- CAPUCIN, B. C.; LLOPART, M.; REBOITA, M. S.; IWABE, C. M. N. Análise sinótica de um período frio em Bauru-SP em julho de 2015. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 53–65, 2019. 2, 46

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Anticiclone subtropical do atlântico sul associado ao modo anular sul e impactos climáticos no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 605–613, 2020. [40](#)

CECCHERINI, G.; RUSSO, S.; AMEZTOY, I.; ROMERO, C. P.; CARMONA-MORENO, C. Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: the case of South America. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 16, n. 3, p. 821–831, 2016. [5](#), [10](#), [14](#), [24](#)

CERNE, S. B.; VERA, C. S. Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. **Climate Dynamics**, v. 36, n. 11, p. 2265–2277, 2011. [3](#), [8](#), [23](#), [47](#), [52](#)

DASH, S.; MAMGAIN, A. Changes in the frequency of different categories of temperature extremes in India. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 9, p. 1842–1858, 2011. [6](#), [12](#)

DELLA-MARTA, P. M.; LUTERBACHER, J.; WEISSENFLUH, H. von; XOPLAKI, E.; BRUNET, M.; WANNER, H. Summer heat waves over western europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. **Climate Dynamics**, v. 29, n. 2, p. 251–275, 2007. [8](#)

DÍAZ, J.; GARCÍA-HERRERA, R.; TRIGO, R.; LINARES, C.; VALENTE, M.; MIGUEL, J. D.; HERNÁNDEZ, E. The impact of the summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it? **International Journal of Biometeorology**, v. 50, n. 3, p. 159–166, 2006. [7](#), [10](#)

DINIZ, F. R.; GONÇALVES, F. L. T.; SHERIDAN, S. Heat wave and elderly mortality: historical analysis and future projection for metropolitan region of São Paulo, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, n. 9, p. 933, 2020. [2](#)

D'IPPOLITI, D.; MICHELOZZI, P.; MARINO, C.; DE'DONATO, F.; MENNE, B.; KATSOUYANNI, K.; KIRCHMAYER, U.; ANALITIS, A.; MEDINA-RAMÓN, M.; PALDY, A. The impact of heat waves on mortality in 9 european cities: results from the euroheat project. **Environmental Health**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2010. [1](#)

DOLE, R.; HOERLING, M.; PERLWITZ, J.; EISCHEID, J.; PEGION, P.; ZHANG, T.; QUAN, X.-W.; XU, T.; MURRAY, D. Was there a basis for anticipating the 2010 russian heat wave? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 6, 2011. [8](#)

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241–254, 2007. 12, 13

FARGE, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 24, n. 1, p. 395–458, 1992. 37

FERON, S.; CORDERO, R.; DAMIANI, A.; LLANILLO, P.; JORQUERA, J.; SEPULVEDA, E.; ASECIO, V.; LAROZE, D.; LABBE, F.; CARRASCO, J. Observations and projections of heat waves in South America. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–15, 2019. 10

FIRPO, M. Â. F.; SANSIGOLO, C. A.; ASSIS, S. V. d. Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 95–106, 2012. 4, 23, 47

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, n. 2, p. 101–101, 1998. 39, 46

FISCHER, E. M.; SCHÄR, C. Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes. **Climate Dynamics**, v. 33, n. 7, p. 917–935, 2009. 1

FRAUEN, C.; DOMMENGET, D.; TYRRELL, N.; REZNY, M.; WALES, S. Analysis of the nonlinearity of El Niño–southern oscillation teleconnections. **Journal of Climate**, v. 27, n. 16, p. 6225–6244, 2014. 15

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293–1302, 1991. 46

GEIRINHAS, J. L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUSA, P. M.; MIRALLES, D. G.; TRIGO, R. M. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, p. 034036, 2021. 48

GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; COELHO, C. A.; PALMEIRA, A. C. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760–1776, 2017. 1, 2, 8, 10, 23, 29

- GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; PERES, L. d. F. Caracterização climática de ondas de calor no Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 333–350, 2018. 5, 7, 47
- GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; CASTRO, L. C.; SOUSA, P. M.; COELHO, C. A.; PERES, L. F.; AVELAR, F. Characterizing the atmospheric conditions during the 2010 heatwave in Rio de Janeiro marked by excessive mortality rates. **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 796–808, 2019. 10
- GERSHUNOV, A.; BARNETT, T. P. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 12, p. 2715–2726, 1998. 20
- GOBATO, R.; HEIDARI, A. Cyclone bomb hits southern Brazil in 2020. **Journal of Atmospheric Science Research**, v. 3, n. 3, 2020. 46
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El niño and La niña events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35–58, 2000. 21
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, n. 5/6, p. 561–566, 2004. 37
- GROTJAHN, R.; FAURE, G. Composite predictor maps of extraordinary weather events in the Sacramento, California, region. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 3, p. 313–335, 2008. 6
- GUO, E.; WANG, Y.; BAO, Y.; SUN, Z.; BAO, Y.; QUAN, L. Spatiotemporal variation of heat and cold waves and their potential relation with the large-scale atmospheric circulation across inner Mongolia, China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 142, n. 1, p. 643–659, 2020. 10, 12, 14
- GUO, X.; HUANG, J.; LUO, Y.; ZHAO, Z.; XU, Y. Projection of heat waves over China for eight different global warming targets using 12 cmip5 models. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, n. 3-4, p. 507–522, 2017. 7, 10
- HANLEY, D. E.; BOURASSA, M. A.; O'BRIEN, J. J.; SMITH, S. R.; SPADE, E. R. A quantitative evaluation of ENSO indices. **Journal of Climate**, v. 16, n. 8, p. 1249–1258, 2003. 17

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, Elsevier, v. 10, p. 4–10, 2015. 9

HERBEL, I.; CROITORU, A.-E.; RUS, A. V.; ROȘCA, C. F.; HARPA, G. V.; CIUPERTEA, A.-F.; RUS, I. The impact of heat waves on surface urban heat island and local economy in Cluj-Napoca city, Romania. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, n. 3, p. 681–695, 2018. 1

HERRING, S. C.; HOERLING, M. P.; PETERSON, T. C.; STOTT, P. A. Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 9, p. Si–S97, 2014. 2

HIDAYAT, R.; JUNIARTI, M.; MA'RUF AH, U. Impact of La Niña and La Niña modoki on Indonesia rainfall variability. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 149, n. 1, p. 012046, 2018. 15

HOREL, J. D.; WALLACE, J. M. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 4, p. 813–829, 1981. 15

HORTON, R. M.; MANKIN, J. S.; LESK, C.; COFFEL, E.; RAYMOND, C. A review of recent advances in research on extreme heat events. **Current Climate Change Reports**, v. 2, n. 4, p. 242–259, 2016. 6

HOWDEN, S.; CRIMP, S. **Effect of climate and climate change on electricity demand in Australia**. [S.l.]: Perth, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2001. 9

HOWELL, J. P. When the lights went out: a history of blackouts in America. **Journal of Historical Geography**, v. 1, n. 38, p. 95–96, 2012. 14

HOY, A.; HAENSEL, S.; SKALAK, P.; USTRNUL, Z.; BOCHNÍČEK, O. The extreme european summer of 2015 in a long-term perspective. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 2, p. 943–962, 2017. 10

HU, A.; XIE, W.; LI, N.; XU, X.; JI, Z.; WU, J. Analyzing regional economic impact and resilience: a case study on electricity outages caused by the 2008 snowstorms in southern China. **Natural Hazards**, v. 70, n. 2, p. 1019–1030, 2014.

14

- HUANG, W.; KAN, H.; KOVATS, S. The impact of the 2003 heat wave on mortality in Shanghai, China. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 11, p. 2418–2420, 2010. 7
- JACONDINO, W. D.; CONRADO, H.; NASCIMENTO, A. Análise de veranicos intensos na região sul do Brasil e condições sinóticas associadas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 2, p. 377–389, 2018. 43
- JIMENEZ, J. C.; LIBONATI, R.; PERES, L. F. Droughts over Amazonia in 2005, 2010, and 2015: a cloud cover perspective. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 227, 2018. 48
- JONES, D. A.; TREWIN, B. C. On the relationships between the El Niño–southern oscillation and australian land surface temperature. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 20, n. 7, p. 697–719, 2000. 20
- KAROLY, D. J. Southern hemisphere circulation features associated with El Niño–southern oscillation events. **Journal of Climate**, v. 2, n. 11, p. 1239–1252, 1989. 20
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño–southern oscillation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D13, 2006. 21
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. de; GARCIA, S. R. Spatiotemporal variability modes of surface air temperature in South America during the 1951–2010 period: ENSO and non-ENSO components. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1–13, 2017. 3
- KEGGENHOFF, I.; ELIZBARASHVILI, M.; KING, L. Heat wave events over georgia since 1961: climatology, changes and severity. **Climate**, v. 3, n. 2, p. 308–328, 2015. 26
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. [S.l.]: Griffin, 1948. 34
- KENYON, J.; HEGERL, G. C. Influence of modes of climate variability on global temperature extremes. **Journal of Climate**, v. 21, n. 15, p. 3872–3889, 2008. 3, 23
- KILADIS, G. N.; DIAZ, H. F. Global climatic anomalies associated with extremes in the southern oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, n. 9, p. 1069–1090, 1989. 15

KILADIS, G. N.; LOON, H. van. The southern oscillation. part vii: meteorological anomalies over the indian and pacific sectors associated with the extremes of the oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 1, p. 120–136, 1988. 18

KLOT, S. von; ZANOBETTI, A.; SCHWARTZ, J. Influenza epidemics, seasonality, and the effects of cold weather on cardiac mortality. **Environmental Health**, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2012. 14

KONG, Q.; GUERREIRO, S. B.; BLENKINSOP, S.; LI, X.-F.; FOWLER, H. J. Increases in summertime concurrent drought and heatwave in eastern China. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, p. 100242, 2020. 6

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A review of the southern oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus A**, v. 36, n. 5, p. 490–504, 1984. 21

KUG, J.-S.; JIN, F.-F.; AN, S.-I. Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. **Journal of Climate**, v. 22, n. 6, p. 1499–1515, 2009. 16

LI, J.; CHEN, Y. D.; GAN, T. Y.; LAU, N.-C. Elevated increases in human-perceived temperature under climate warming. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 1, p. 43–47, 2018. 2

LIN, L.; CHEN, C.; LUO, M. Impacts of El Niño–southern oscillation on heat waves in the Indochina peninsula. **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 11, p. e856, 2018. 1, 23

LOIKITH, P. C.; BROCCOLI, A. J. Characteristics of observed atmospheric circulation patterns associated with temperature extremes over North America. **Journal of Climate**, v. 25, n. 20, p. 7266–7281, 2012. 8

LOUGHRAN, T. F.; PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; ALEXANDER, L. V. Understanding the spatio-temporal influence of climate variability on australian heatwaves. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 10, p. 3963–3975, 2017. 23

LUCYRIO, V.; REBOITA, M. S.; ALBIERI, M. d. C. G. Ondas de frio intensas sobre o centro-norte do Estado de São Paulo de 1961 a 2017. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. 2

LUO, M.; LAU, N.-C. Synoptic characteristics, atmospheric controls, and long-term changes of heat waves over the indochina peninsula. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 7, p. 2707–2723, 2018. 1, 23

LUPO, A. R.; NOCERA, J. J.; BOSART, L. F.; HOFFMAN, E. G.; KNIGHT, D. J. South american cold surges: types, composites, and case studies. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1021–1041, 2001. [12](#), [13](#)

MA, H.-Y.; JI, X.; NEELIN, J.; MECHOSO, C. Mechanisms for precipitation variability of the eastern BRAZIL/SACZ convective margin. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3445–3456, 2011. [40](#)

MAHDI, S. S.; DHEKALE, B.; CHOUDHURY, S. R.; BANGROO, S. A.; GUPTA, S. K. On the climate risks in crop production and management in India: a review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 7, p. 585, 2015. [14](#)

MALCHEVA, K. Cold waves on the territory of Bulgaria in the period 1952-2011. **Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology**, v. 22, n. 3-4, p. 16–31, 2017. [11](#), [12](#)

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169–172, 2008. [20](#)

MANDÚ, T. B.; GOMES, A. C. D. S.; COSTA, G. B.; NEVES, T. T. d. A. T. Avaliação de tendência nas ondas de calor registradas em Manaus/AM, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020. [10](#), [47](#)

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 245–259, 1945. [34](#)

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; BARRETO, N.; CUNHA, A. P.; RAMOS, A. M.; SKANSI, M.; CARPIO, J. M.; SALINAS, R. The heat wave of october 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, 2021. [47](#)

MCGREGOR, G. R.; FELLING, M.; WOLF, T.; GOSLING, S. The social impacts of heat waves. **Environment Agency**, 2007. [9](#)

MCPHADEN, M. J.; ZEBIAK, S. E.; GLANTZ, M. H. ENSO as an integrating concept in Earth science. **Science**, v. 314, n. 5806, p. 1740–1745, 2006. [15](#), [20](#)

METZGER, K. B.; ITO, K.; MATTE, T. D. Summer heat and mortality in New York city: how hot is too hot? **Environmental Health Perspectives**, v. 118, n. 1, p. 80–86, 2010. [7](#)

- MIMMACK, G. M.; MASON, S. J.; GALPIN, J. S. Choice of distance matrices in cluster analysis: defining regions. **Journal of Climate**, v. 14, n. 12, p. 2790–2797, 2001. 26
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 33
- MORA, C.; DOUSSET, B.; CALDWELL, I. R.; POWELL, F. E.; GERONIMO, R. C.; BIELECKI, C. R.; COUNSELL, C. W.; DIETRICH, B. S.; JOHNSTON, E. T.; LOUIS, L. V. Global risk of deadly heat. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 7, p. 501–506, 2017. 1
- MORABITO, M.; CRISCI, A.; GRIFONI, D.; ORLANDINI, S.; CECCHI, L.; BACCI, L.; MODESTI, P. A.; GENSINI, G. F.; MARACCHI, G. Winter air-mass-based synoptic climatological approach and hospital admissions for myocardial infarction in Florence, Italy. **Environmental Research**, v. 102, n. 1, p. 52–60, 2006. 14
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. [S.l.]: Saraiva, 2017. 32
- MURARI, K. K.; SAHANA, A.; DALY, E.; GHOSH, S. The influence of the El Niño southern oscillation on heat waves in India. **Meteorological Applications**, v. 23, n. 4, p. 705–713, 2016. 1, 3, 23
- MUTHERS, S.; LASCHEWSKI, G.; MATZARAKIS, A. The summers 2003 and 2015 in south-west Germany: heat waves and heat-related mortality in the context of climate change. **Atmosphere**, v. 8, n. 11, p. 224, 2017. 10
- NAIRN, J.; FAWCETT, R. Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all. **Europe**, v. 220, p. 224, 2011. 13
- NAIRN, J. R.; FAWCETT, R. J. The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 12, n. 1, p. 227–253, 2015. 9
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). **Climate prediction center**. 2021. Disponível em: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Acesso em: 23 jan. 2021. 16, 18, 19, 20
- NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600–614, 2017. 36

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252–262, 2016. [56](#)

OUESLATI, B.; POHL, B.; MORON, V.; ROME, S.; JANICOT, S. Characterization of heat waves in the sahel and associated physical mechanisms. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3095–3115, 2017. [8](#), [23](#), [47](#)

PANTELI, M.; MANCARELLA, P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: impacts and possible mitigation strategies. **Electric Power Systems Research**, v. 127, p. 259–270, 2015. [14](#)

PARKER, D. Documentation of a southern oscillation index. **Meteorological Magazine**, v. 112, p. 184–188, 1983. [18](#)

PARKER, T. J.; BERRY, G. J.; REEDER, M. J. The influence of tropical cyclones on heat waves in southeastern Australia. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 23, p. 6264–6270, 2013. [9](#)

PARKER, T. J.; BERRY, G. J.; REEDER, M. J.; NICHOLLS, N. Modes of climate variability and heat waves in Victoria, southeastern Australia. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 19, p. 6926–6934, 2014. [9](#), [15](#)

PERKINS-KIRKPATRICK, S.; LEWIS, S. Increasing trends in regional heatwaves. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2020. [2](#), [7](#), [10](#), [11](#)

PERKINS-KIRKPATRICK, S.; WHITE, C.; ALEXANDER, L.; ARGÜESO, D.; BOSCHAT, G.; COWAN, T.; EVANS, J.; EKSTRÖM, M.; OLIVER, E.; PHATAK, A. Natural hazards in Australia: heatwaves. **Climatic Change**, v. 139, n. 1, p. 101–114, 2016. [9](#), [24](#)

PERKINS, S. E. A review on the scientific understanding of heatwaves—their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. **Atmospheric Research**, v. 164, p. 242–267, 2015. [7](#)

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. On the measurement of heat waves. **Journal of Climate**, v. 26, n. 13, p. 4500–4517, 2013. [5](#), [6](#), [7](#), [29](#)

PETERSON, T. C.; KARL, T. R.; KOSSIN, J. P.; KUNKEL, K. E.; LAWRIK, J. H.; MCMAHON, J. R.; VOSE, R. S.; YIN, X. Changes in weather and climate extremes: state of knowledge relevant to air and water quality

in the United States. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 64, n. 2, p. 184–197, 2014. 14

PETTITT, A. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979. 35

PEZZA, A. B.; RENSCH, P. V.; CAI, W. Severe heat waves in southern Australia: synoptic climatology and large scale connections. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 1-2, p. 209–224, 2012. 6

PITICAR, A.; CHEVAL, S.; FRIGHENCIU, M. A review of recent studies on heat wave definitions, mechanisms, changes, and impact on mortality. **Forum Geografic**, v. 18, n. 2, p. 96–114, 2019. 3, 7, 8, 9

QUADRO, M. F. L. d.; DIAS, M. A. F. d. S.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. d. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 152–162, 2012. 46

RADINOVIĆ, D.; ĆURIĆ, M. Criteria for heat and cold wave duration indexes. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 3, p. 505–510, 2012. 6

\_\_\_\_\_. Measuring scales for daily temperature extremes, precipitation and wind velocity. **Meteorological Applications**, v. 21, n. 3, p. 461–465, 2014. 12

RATNAM, J.; BEHERA, S. K.; ANNAMALAI, H.; RATNA, S. B.; RAJEEVAN, M.; YAMAGATA, T. Enso's far reaching connection to indian cold waves. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1–12, 2016. 4

REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G.; LOPES, V. Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015. 2, 12, 13

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. d.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. 39, 46

REBOITA, M. S.; KRUCHE, N. Normais climatológicas provisórias de 1991 a 2010 para Rio Grande, RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 165–179, 2018. 26

REGOTO, P.; DERECZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**. 26

REIS, N. C. S.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T. Characterization and spatial coverage of heat waves in subtropical Brazil. **Atmosphere**, v. 10, n. 5, p. 284, 2019. 6

ROBINE, J.-M.; CHEUNG, S. L. K.; ROY, S. L.; OYEN, H. V.; GRIFFITHS, C.; MICHEL, J.-P.; HERRMANN, F. R. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. **Comptes Rendus Biologies**, v. 331, n. 2, p. 171–178, 2008. 10

ROBINSON, P. J. On the definition of a heat wave. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 40, n. 4, p. 762–775, 2001. 5

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/southern oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1606–1626, 1987. 15, 20

ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53–65, 1987. 28

RUSSO, S.; SILLMANN, J.; FISCHER, E. M. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 124003, 2015. 7, 10

RUSTICUCCI, M. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. **Atmospheric Research**, v. 106, p. 1–17, 2012. 1, 24

RUSTICUCCI, M.; KYSELÝ, J.; ALMEIRA, G.; LHOTKA, O. Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 3-4, p. 679–689, 2016. 7, 26

RUSTICUCCI, M.; VARGAS, W. Cold and warm events over Argentina and their relationship with the ENSO phases: risk evaluation analysis. **International Journal of Climatology**, v. 22, n. 4, p. 467–483, 2002. 1

RYTI, N. R.; GUO, Y.; JAAKKOLA, J. J. Global association of cold spells and adverse health effects: a systematic review and meta-analysis. **Environmental Health Perspectives**, v. 124, n. 1, p. 12–22, 2016. 14

- SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016. 34, 35
- SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. e. Precipitation regionalization of the brazilian Amazon. **Atmospheric Science Letters**, v. 16, n. 3, p. 185–192, 2015. 26, 41, 46
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. 36
- SHAPOSHNIKOV, D.; REVICH, B.; BELLANDER, T.; BEDADA, G. B.; BOTTAI, M.; KHARKOVA, T.; KVASHA, E.; LEZINA, E.; LIND, T.; SEMUTNIKOVA, E. Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. **Epidemiology (Cambridge, Mass.)**, v. 25, n. 3, p. 359, 2014. 9, 10
- SILVA, M. d. N. A. d.; PESSOA, F. C. L.; SILVEIRA, R. N. P. d. O.; ROCHA, G. S.; MESQUITA, D. A. Determinação da homogeneidade e tendência das precipitações na bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 665–675, 2018. 28, 46
- SILVA, W. L.; NASCIMENTO, M. X.; MENEZES, W. F. Atmospheric blocking in the south atlantic during the summer 2014: a synoptic analysis of the phenomenon. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 5, n. 04, p. 386, 2015. 43
- SILVEIRA, R. B.; ALVES, M. P.; BARREIRO, M.; BITENCOURT, D. P. Ondas de calor nas capitais do sul do Brasil e Montevideú-Uruguai. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 04, p. 1259–1276, 2019. 5
- SILVEIRA, R. B.; MENDONÇA, M.; FRANKE, A. E.; BITENCOURT, D. P. Impactos das ondas de frio sobre a saúde pública no município de São Joaquim-Santa Catarina-Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018. 2
- SMID, M.; RUSSO, S.; COSTA, A. C.; GRANELL, C.; PEBESMA, E. Ranking european capitals by exposure to heat waves and cold waves. **Urban Climate**, v. 27, p. 388–402, 2019. 2, 3, 12, 14, 30, 56
- SON, J.-Y.; BELL, M. L.; LEE, J.-T. The impact of heat, cold, and heat waves on hospital admissions in eight cities in Korea. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 9, p. 1893–1903, 2014. 9

- SOUZA, E. d.; AMBRIZZI, T. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**, v. 1, p. 1–20, 2003. 46
- STEPHENSON, D. B.; DIAZ, H.; MURNANE, R. Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. **Climate Extremes and Society**, v. 340, p. 11–23, 2008. 1
- TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F.; GRIMM, A. M. Influences of two types of ENSO on south american precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1382–1400, 2013. 16
- TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. Influence of central and east ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 8, p. 2045–2064, 2015. 16
- THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, n. 7, p. 1082–1089, 1911. 28
- TOMCZYK, A. M.; BEDNORZ, E. Heat waves in central Europe and their circulation conditions. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 770–782, 2016. 2
- TOMCZYK, A. M.; PÓŁROLNICZAK, M.; BEDNORZ, E. Circulation conditions' effect on the occurrence of heat waves in western and southwestern Europe. **Atmosphere**, v. 8, n. 2, p. 31, 2017. 5
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1998. 36, 37
- TRENBERTH, K. E. The definition of El Nino. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771–2778, 1997. 15, 19, 31
- ULIANA, E. M. et al. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Revista Ambiente e Água**, p. 82–88, 2015. 35
- UNAL, Y. S.; TAN, E.; MENTES, S. S. Summer heat waves over western Turkey between 1965 and 2006. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, n. 1, p. 339–350, 2013. 7
- UTIDA, G.; CRUZ, F. W.; ETOURNEAU, J.; BOULOUBASSI, I.; SCHEFUSS, E.; VUILLE, M.; NOVELLO, V. F.; PRADO, L. F.; SIFEDDINE, A.; KLEIN, V.

Tropical south atlantic influence on northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2019. 46

VALLADARES, J. N.; SANTOS, C. B. dos; TORRES, É. M.; ESTRELA, C. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**, v. 26, n. 76, 2017. 33

WANG, C.; DESER, C.; YU, J.-Y.; DINEZIO, P.; CLEMENT, A. El Niño and southern oscillation (ENSO): a review. In: GLYNN P. W.; MANZELLO, D. P. E. I. C. (Ed.). **Coral reefs of the eastern tropical Pacific**. Berlin: Springer, 2017. p. 85–106. 15

WANG, H.; FU, R. The influence of amazon rainfall on the atlantic ITCZ through convectively coupled kelvin waves. **Journal of Climate**, v. 20, n. 7, p. 1188–1201, 2007. 46

WANG, L.; CHEN, W.; HUANG, R. Interdecadal modulation of pdo on the impact of enso on the east asian winter monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, 2008. 20

WARD, J. H. J. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963. 28

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. [S.l.]: Academic press, 2011. 26, 28, 34

WMO, W. M. O. **Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events; December 2015**. [S.l.]: World Meteorological Organization, 2016. 5, 6, 11, 12

WOLTER, K.; TIMLIN, M. S. Measuring the strength of ENSO events: how does 1997/98 rank? **Weather**, v. 53, n. 9, p. 315–324, 1998. 17, 18

\_\_\_\_\_. El Niño/southern oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate enso index (mei. ext). **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 7, p. 1074–1087, 2011. 17, 18

XIE, W.; ZHOU, B.; YOU, Q.; ZHANG, Y.; ULLAH, S. Observed changes in heat waves with different severities in China during 1961–2015. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 3, p. 1529–1540, 2020. 5, 7

YEH, S. W.; KUG, J. S.; DEWITTE, B.; KWON, M. H.; KIRTMAN, B. P.; JIN, F. F. Erratum: El Niño in a changing climate (nature (2009) 461 (511-514)). **Nature**, v. 462, n. 7273, 2009. 16

YU, J.-Y.; KAO, H.-Y.; LEE, T.; KIM, S. T. Subsurface ocean temperature indices for central-pacific and eastern-pacific types of El Niño and La Niña events. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 103, n. 3, p. 337–344, 2011. 19

ZHANG, X.; YANG, F. Rclimindex (1.0) user manual. **Climate Research Branch Environment Canada**, v. 22, 2004. 26

ZHANG, Y.; MOGES, S.; BLOCK, P. Optimal cluster analysis for objective regionalization of seasonal precipitation in regions of high spatial–temporal variability: application to western ethiopia. **Journal of Climate**, v. 29, n. 10, p. 3697–3717, 2016. 28

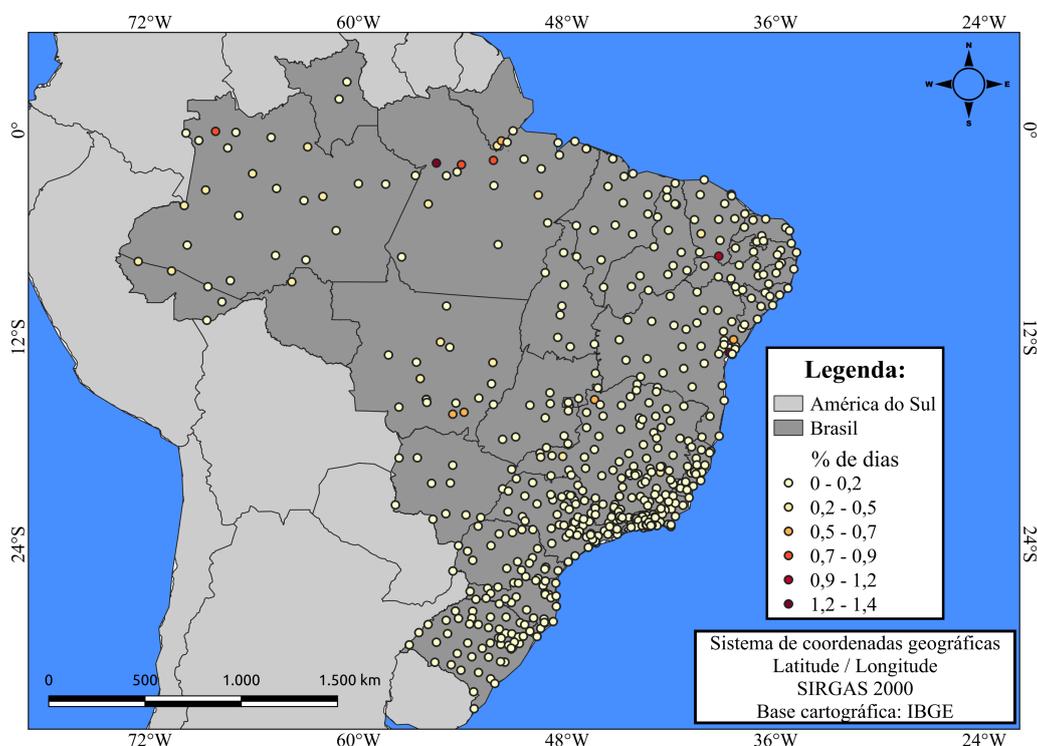
ZHAO, Q.; LI, S.; COELHO, M. S.; SALDIVA, P. H.; HU, K.; HUXLEY, R. R.; ABRAMSON, M. J.; GUO, Y. The association between heatwaves and risk of hospitalization in Brazil: a nationwide time series study between 2000 and 2015. **PLoS Medicine**, v. 16, n. 2, p. e1002753, 2019. 9



## APÊNDICE A - CONSISTÊNCIA DOS DADOS

Na Figura A.1 é retratada a análise de consistência para os dados de temperatura mínima do ar, apresentado de forma percentual pois o período de dados não é o mesmo dentre as estações meteorológicas analisadas. Para o total de 364 estações não foi removido nenhum registro que corresponde a 66,7% das estações analisadas, com 8 estações apresentando porcentagem entre 0,5 e 0,7%, os máximos foram observados em Óbidos-PA (1,4%), Itaparica-BA (1,4%) e Barbalha-CE (1,1%).

Figura A.1 - Porcentagem dos dias de temperatura mínima do ar removidos pela análise de consistência.

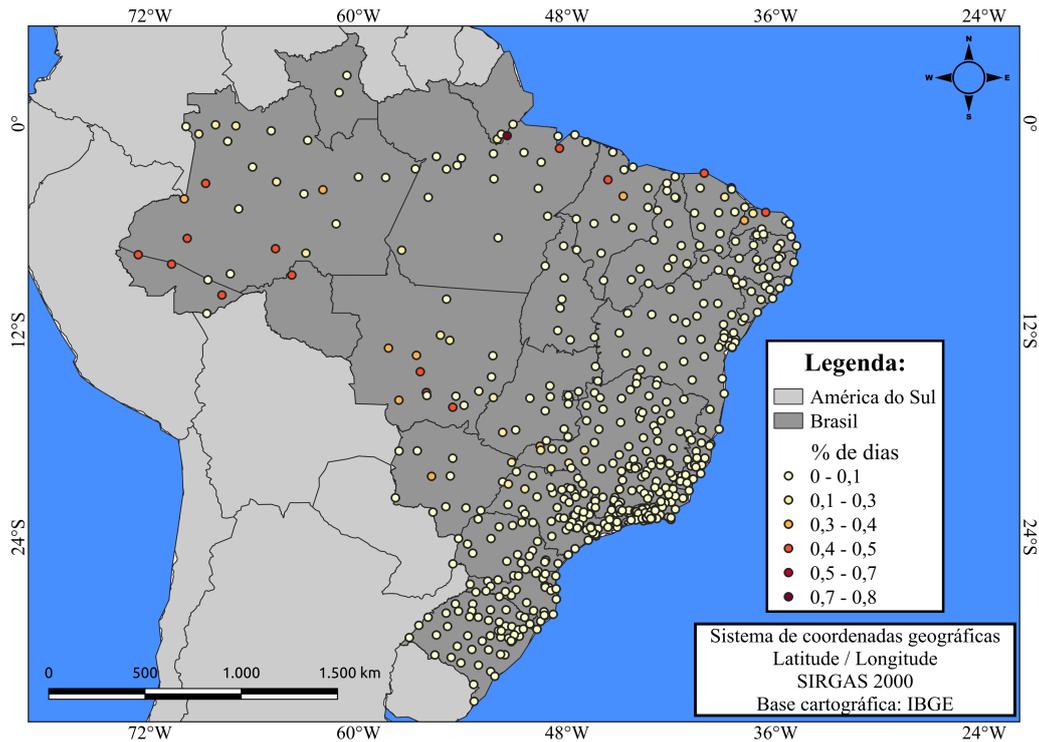


Fonte: Produção do autor.

A partir de comparações entre as Figura A.1 e Figura A.2, nota-se que para a temperatura média do ar o intervalo de variação é diferente do observado na temperatura mínima do ar, com as maiores porcentagens em torno de 0,8%, que ocorrem nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, com baixas porcentagens superiores a 0,3% sobre a região Sudeste e nenhum registro removido no Sul do Brasil. Não foram re-

movidos dados em 430 estações meteorológicas (78,7%), com os maiores percentuais observados nas estações de Porto Platon-AP (0,8%), seguido de 0,5% observado em Belém-PA, Acaraú-CE, Porto Velho-RO e Rio Branco-AC.

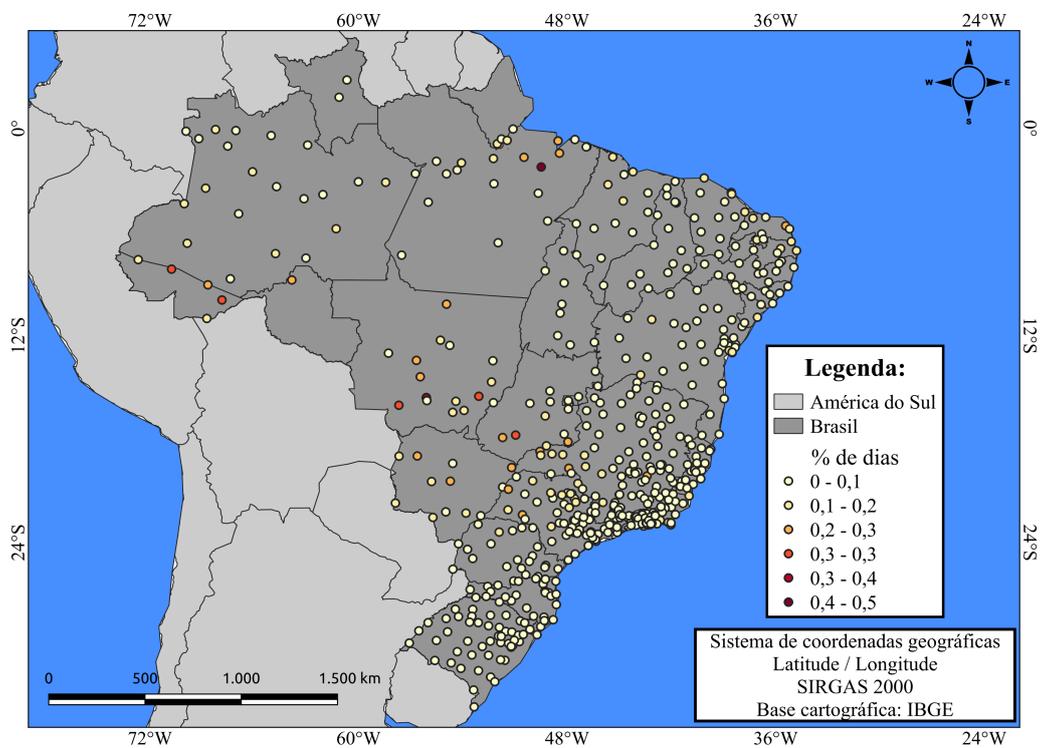
Figura A.2 - Porcentagem dos dias de temperatura média do ar removidos pela análise de consistência.



Fonte: Produção do autor.

Referente a análise de consistência para a temperatura máxima do ar (Figura A.3), nota-se que a variação é inferior ao observado na temperatura mínima e média, indicando que dentre as 3 temperatura do ar analisadas, a que apresentou o máximo de menor porcentagem foi a temperatura máxima do ar. Onde em 82,0% das estações não foram removidos registros, com valores superior a 0,2% observados apenas nas regiões Norte e Centro-Oeste, com os máximos observados em Cametá-PA (0,5%), Cuiabá-MT (0,4%) e 0,3% em Tarauacá-AC, Rio Branco-AC, Meruri-MT, Cáceres-MT e Rio Verde-GO.

Figura A.3 - Porcentagem dos dias de temperatura máxima do ar removidos pela análise de consistência.



Fonte: Produção do autor.