



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza  
Instituto de Geociências  
Departamento de Meteorologia

**CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE  
TEMPERATURA DAS REGIÕES METROPOLITANAS DE BELO  
HORIZONTE, RIO DE JANEIRO E SÃO PAULO E SUAS  
RELAÇÕES COM A CARGA DE ENERGIA ELÉTRICA DO  
SUBSISTEMA ELÉTRICO SUDESTE/CENTRO-OESTE**

Lucas Cesar Osorio de Castro

Orientadores: D. Sc. Renata Libonati dos Santos

D. Sc. Leonardo de Faria Peres

**CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA DAS  
REGIÕES METROPOLITANAS DE BELO HORIZONTE, RIO DE JANEIRO E  
SÃO PAULO E SUAS RELAÇÕES COM A CARGA DE ENERGIA ELÉTRICA  
DO SUBSISTEMA ELÉTRICO SUDESTE/CENTRO-OESTE.**

LUCAS CESAR OSORIO DE CASTRO

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Ciências da Área de Meteorologia

Área de Concentração: Energia Elétrica, Ondas de Calor, Ondas de Frio, Climatologia

Orientadores: D. Sc. Renata Libonati dos Santos  
D. Sc. Leonardo de Faria Peres

Rio de Janeiro  
Abril, 2025

**CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA DAS  
REGIÕES METROPOLITANAS DE BELO HORIZONTE, RIO DE JANEIRO E  
SÃO PAULO E SUAS RELAÇÕES COM A CARGA DE ENERGIA ELÉTRICA  
DO SUBSISTEMA ELÉTRICO SUDESTE/CENTRO-OESTE.**

**LUCAS CESAR OSORIO DE CASTRO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

---

**Profa. Dra. Renata Libonati dos Santos - PPGM/UFRJ - Orientadora**

---

**Prof. Dr. Leonardo de Faria Peres – PPGM/UFRJ – Coorientador**

---

**Prof. Dr. Ricardo Machado Trigo - ULisboa**

---

**Prof. Dr. Wanderson Luiz Silva - PPGM/UFRJ**

---

**Prof. Dr. André Frossard Pereira de Lucena – PPE/COPPE/UFRJ**

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Abril, 2025

*“É preciso sonhar, mas com a condição de crer em nosso sonho, de observar com atenção a vida real, de confrontar a observação com nosso sonho, de realizar escrupulosamente nossas fantasias.*

*Sonhos, acredite neles.”*

(Vladimir Ilyich Ulyanov)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Roger e Eliane e aos meus irmãos Caio e Pedro, por nunca terem medido esforços para que eu pudesse ter uma educação de excelência, além de sempre terem me dado todo suporte e amor. Sem vocês, nada disto seria possível. Esta conquista é nossa!

A minha esposa e amor da minha vida Gabriela Kafa, por todo amor e carinho ao longo de todos os anos que estamos juntos, por ter sido mais que uma companheira nessa jornada, uma ouvinte paciente, sempre estando ao meu lado e apoiando incansavelmente. Você tornou tudo mais fácil!

Agradeço aos amigos que fiz no decorrer dos anos da Graduação e do mestrado na Meteorologia/UFRJ, como a Júlia Carelli, Vitor Miranda, Filipe Pungirum, Larissa Freitas. Agradeço também a todos os amigos do Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientes (LASA/UFRJ) por toda ajuda, paciência e companheirismo. A vocês todos, obrigado por tudo!

Aos meus orientadores Renata Libonati e Leonardo Peres, agradeço pela paciência e pelo tempo dispensado a mim, por todos os ensinamentos dentro e fora de universidade. Agradeço também aos membros da banca examinadora, por aceitarem me avaliar e contribuir.

Agradeço ao Grupo Energisa, especialmente a equipe Middle Office e Front Office da (re)energisa comercializadora, por todos os ensinamentos, discussões e troca de ideias durante o desenvolvimento do meu trabalho. Em especial, agradeço aos grandes amigos que fiz dentro da Energisa: Othon Ávila, Felipe Lento, Geovane Mancini, Gregory Matos, Lucas Resende, Jerson Carvalho e Luiz Felipe.

Por fim, ao Club de Regatas Vasco da Gama por sua história, conquistas inspiradoras, pioneiro e revolucionário, educando e sempre ensinando que o impossível é questão de opinião. Agradeço também o grupo de conselheiros “Ao Vasco, Tudo!” e ao pessoal do Torcida Organizada Mancha Negra Vasco, a Torcida Ira Jovem Vasco e a Guerreiros do Almirante pelo acolhimento ao longo desses anos, companheirismo e confraternizações na Barreira do Vasco, parcerias que duram mais de 10 anos.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal investigar as relações entre os valores das temperaturas máximas e mínimas ( $T_{max}$  e  $T_{min}$ , respectivamente) das Regiões Metropolitanas de Belo Horizonte (RMBH), Rio de Janeiro (RMRJ) e de São Paulo (RMSP) e a carga de energia elétrica do Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), provenientes do Operador Nacional do Sistema (ONS) com período de 2002 a 2022. Além disso, estima-se caracterizar e identificar Eventos Extremos de Temperatura (EET's) como fenômenos de Ondas de Calor (OC's) e de Ondas de Frio (OF's) nessas regiões, avaliando sua frequência, intensidade e duração no período de 1980 a 2022, além de investigar a relação entre a ocorrência desses eventos e as fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e avaliar o impacto de eventos de pontuais OC's e OF's nas variações da carga e os padrões sinóticos associados a esses casos. Os resultados indicam que a correlação entre essas variáveis passou a ser mais significativa a partir de 2010, sendo que para  $T_{min}$  ( $T_{max}$ ) aumenta, em média, 45% (73%) entre as áreas estudadas. Além disso, foi verificado que valores a partir de 30°C de  $T_{max}$  (20°C, em média, para  $T_{min}$ ) entre as regiões metropolitanas possui potencial para provocar desvios positivos da carga de forma mais expressiva, já quando  $T_{max}$  está abaixo de 25°C (17°C, em média, para  $T_{min}$ ) há chance de redução dos valores de carga. Ao avaliar casos de OC e OF que resultaram num aumento e redução expressiva da carga, nomeadamente 2.343MW acima do percentil 90 e 1.665MW abaixo do percentil 10, respectivamente, foi possível determinar as condições sinóticas que mais impactam o Subsistema SE/CO. No caso de OC's, percebe-se a atuação de bloqueios atmosféricos, com suporte de advecção de ar quente proveniente de regiões mais secas e de níveis mais altos para próximo da superfície. Por outro lado, a ocorrência de OF's associada a passagem de frente fria e advecção de ar frio por meio de sistema de alta pressão migratório pós-frontal, assim como o suporte de advecção de ar frio de altos para baixos níveis na troposfera. De forma geral, este trabalho evidencia como a temperatura do ar influencia a carga do Subsistema SE/CO, explicitando relações históricas, bem como os efeitos de eventos pontuais, além de abordar as condições de tempo associados a EET's, gerando informações relevantes para o planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

## ABSTRACT

This study aims primarily to investigate the relationships between maximum and minimum temperature values ( $T_{\max}$  and  $T_{\min}$ , respectively) in the Metropolitan Regions of Belo Horizonte (MRBH), Rio de Janeiro (MRRJ), and São Paulo (MRSP) and the electric load of the Southeast/Central-West (SE/CO) Subsystem, using data from the National System Operator (ONS) for the period from 2002 to 2022. Additionally, the study seeks to characterize and identify Extreme Temperature Events (ETEs), such as Heat Waves (HWs) and Cold Waves (CWs), in these regions by evaluating their frequency, intensity, and duration from 1980 to 2022. It also investigates the relationship between the occurrence of these events and the phases of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), as well as assesses the impact of specific HW and CW events on load variations and the synoptic patterns associated with those cases. The results indicate that the correlation between these variables became more significant starting in 2010, with  $T_{\min}$  ( $T_{\max}$ ) correlations increasing by an average of 45% (73%) across the studied areas. Moreover, it was observed that  $T_{\max}$  values above 30 °C (and  $T_{\min}$  values averaging 20 °C) in the metropolitan regions have the potential to generate more significant positive deviations in electric load. Conversely, when  $T_{\max}$  is below 25 °C (and  $T_{\min}$  averages around 17 °C), there is a likelihood of reduced load values. By analyzing HW and CW cases that led to significant increases and decreases in load — specifically, 2,343 MW above the 90th percentile and 1,665 MW below the 10th percentile, respectively — it was possible to determine the synoptic conditions that most impact the SE/CO Subsystem. In HW cases, atmospheric blocking was observed, supported by warm air advection from drier regions and from higher to lower atmospheric levels near the surface. In contrast, CW occurrences were associated with cold front passages and cold air advection driven by post-frontal migratory high-pressure systems, along with cold air support descending from higher to lower levels in the troposphere. Overall, this study highlights how air temperature influences the SE/CO Subsystem load, revealing historical relationships and the effects of specific events, while also addressing the weather conditions associated with ETEs. These findings provide relevant information for the planning and operation of the Brazilian National Interconnected System (NIS).

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Objetivos.....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1.	Características do Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil .....	4
2.2.	Eventos Extremos de Temperatura e seus Impactos sobre Sistema Elétricos..	9
3.	DADOS E MÉTODOS .....	15
3.1.	Área de Estudo .....	15
3.2.	Dados.....	16
3.3.	Metodologia.....	18
3.3.1	Caracterização e Análise dos Eventos de OC's e OF's .....	18
3.3.2	Remoção de Tendência da Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO	19
3.3.3	Análise das relações entre a carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO e os valores diários de Tmax e Tmin .....	22
3.3.4	Avaliação do Impacto das Fases do ENOS sobre a ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura.....	26
3.3.5	Análise de Estudos de Casos: Comportamento da Carga em decorrência de Extremos de Temperatura e os Padrões Sinóticos Associados .....	27
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1	Representatividade do Subsistema SE/CO .....	30
4.2	Caracterização dos Eventos Extremos de Temperatura .....	34
4.2.1	RMBH .....	34
4.2.2	RMRJ.....	40
4.2.3	RMSP .....	46
4.3	Relações entre os Eventos Extremos de Temperatura ocorridos entre RMBH, RMRJ e RMSP .....	52

4.4	Relações entre Eventos Extremos de Temperatura e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) .....	56
4.5	Relações entre a Carga Normalizada de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO e os valores de Tmax e Tmin de RMBH, RMRJ e RMSP .....	60
4.6	Estudo de caso 1: alterações na Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO em decorrência da OF ocorrida em maio de 2020 .....	66
4.7	Estudo de caso 2: alterações na Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO em decorrência da OC ocorrida entre setembro e outubro de 2020 .....	75
4.8	Discussão dos Resultados: Caracterização dos Eventos Extremos de Temperatura ocorridos em RMBH, RMRJ e RMSP, e suas relações com o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) .....	86
4.9	Discussão dos Resultados: Relações entre a Tmax e Tmin das Regiões Metropolitanas e a Carga Normalizada de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO ..	91
4.10	Discussão dos Resultados: Estudos de Caso – Impactos dos eventos de OC e OF sobre a Carga Normalizada de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO e Padrões Sinóticos associados .....	95
5.	CONCLUSÕES .....	103
6.	REFERÊNCIAS .....	107
	ANEXO I .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Capacidade instalada por fontes de geração - SIN 2024. Fonte: (ONS, 2024). .....	6
Figura 2.2: Representação atual do Mapa Geoelétrico do Sistema Interligado Nacional. Fonte: (ONS, 2025b). ....	7
Figura 2.3: Representação dos Subsistemas Elétricos do SIN e os estados que os compõem, respectivamente. ....	8
Figura 2.4: Média da carga de energia elétrica durante o ano de 2024 para os Subsistemas Elétricos do SIN. Fonte: (ONS, 2024).....	9
Figura 3.1: Representação da e RMBH, RMRJ e RMSP, inseridas no Subsistema SE/CO, destacando as estações meteorológicas utilizadas no presente estudo. ....	16
Figura 3.2: Fluxograma indicando passos do método para detecção e definição de OC's e OF's, aplicados para a base de dados de RMBH, RMRJ e RMSP.....	19
Figura 3.3: Evolução da série histórica da carga do Subsistema SE/CO antes (letra a) e após (letra b) a remoção de tendência pelo “Método LS”. ....	22
Figura 3.4: Fluxograma exemplificando processo do cálculo da correlação de Spearman para cada ano da série de dados entre a carga de energia elétrica normalizada do Subsistema SE/CO e as variáveis de temperatura de cada Região Metropolitana. ....	24
Figura 3.5: Fluxograma indicando etapas da construção da base de dados relacional entre Tmax, Tmin, carga normalizada do SE/CO e o índice ONI, usados para a construção de boxplots categorizados. ....	26
Figura 3.6: Mapa representativo demarcando intervalo de longitude 60°O e 50°O, usado para calcular o comportamento médio das variáveis de Velocidade Vertical (W) e Temperatura do Ar (TAR), variando entre a latitudesde 50°S e 15°S, demarcando a localização de RMBH, RMRJ e RMSP.....	28
Figura 3.7: Mapa representativo demarcando intervalo de latitude 18°S e 26°S, usado para calcular o comportamento médio das variáveis de Velocidade Vertical (W) e Temperatura do Ar (TAR), variando entre a longitude de 60°O e 25°O, demarcando a localização de RMBH, RMRJ e RMSP. ....	29
Figura 4.1: Representação percentual de cada Susbistema Elétrico em relação a carga total de energia elétrica do SIN, considerando o ano de 2022. Fonte: ONS (2023).....	31

Figura 4.2: Representação percentual do consumo de energia elétrica de cada Unidade Federativa do SE/CO (letra a) e por classe de consumo, destacando a conjuntura do SE/CO e dos principais estados (letra b). Font: EPE (2023). .....	33
Figura 4.3: Total de OC's diurnas e noturnas (detectadas com os índices CTX90pct e CTN90pct, respectivamente) por estações do ano para RMBH durante o período de jan/1980 a fev/2022. ....	35
Figura 4.4: Total de OC's diurnas (detectadas com CTX90pct) registrada em RMBH, segregando pela intensidade dos eventos (moderado, severo e extremo) e o total de dias para cada ano. ....	36
Figura 4.5: idem Figura 4.4, porém para OC's noturnas em RMBH.....	37
Figura 4.6: idem Figura 4.3, porém para OF's diurnas (detectadas usando o limiar CTX10pct) e noturnas (detectadas usando o limiar CTN10pct) em RMBH.....	38
Figura 4.7: idem Figura 4.4 e Figura 4.5, porém para OF's diurnas em RMBH. ....	39
Figura 4.8: idem Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.7, porém para OF's noturnas em RMBH. ....	40
Figura 4.9: Total de OC's diurnas e noturnas (detectadas com os índices CTX90pct e CTN90pct, respectivamente) por estações do ano para RMRJ durante o período de jan/1980 a fev/2022. ....	41
Figura 4.10: Total de OC's diurnas (detectadas com CTX90pct) registrada em RMRJ, segregando pela intensidade dos eventos (moderado, severo e extremo) e o total de dias para cada ano. ....	42
Figura 4.11: idem Figura 4.10, porém para OC's noturnas em RMRJ. ....	43
Figura 4.12: idem Figura 4.9, porém para OF's diurnas (detectadas usando o limiar CTX10pct) e noturnas (detectadas usando o limiar CTN10pct) em RMRJ. ....	44
Figura 4.13: idem Figura 4.10 e Figura 4.11, porém para OF's diurnas em RMRJ. ....	45
Figura 4.14: idem Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.13, porém para OF's noturnas em RMRJ.....	46
Figura 4.15: Total de OC's diurnas e noturnas (detectadas com os índices CTX90pct e CTN90pct, respectivamente) por estações do ano para RMSP durante o período de jan/1980 a fev/2022. ....	47
Figura 4.16: Total de OC's diurnas (detectadas com CTX90pct) registrada em RMSP, segregando pela intensidade dos eventos (moderado, severo e extremo) e o total de dias para cada ano. ....	48

Figura 4.17: idem Figura 4.16, porém para OC's noturnas em RMSP.....	49
Figura 4.18: idem Figura 4.15, porém para OF's diurnas (detectadas usando o limiar CTX10pct) e noturnas (detectadas usando o limiar CTN10pct) em RMSP.....	50
Figura 4.19: idem Figura 4.16 e Figura 4.17, porém para OF's diurnas em RMSP. ....	51
Figura 4.20: idem Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.19, porém para OF's noturnas em RMSP. ....	52
Figura 4.21: Matriz de correlação de Spearman relacionando o total de EET's diurnos e noturnos, sejam OC's ou OF's, ocorridos entre as Regiões Metropolitanas de interesse (RMBH, RMRJ, RMSP). Os asteriscos em preto destacam as correlações que não possuem significância estatística (p-value maior que 0.05), as demais correlações possuem significância estatística com nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05).....	53
Figura 4.22: Matriz de correlação de Spearman relacionando o total de EET's, OC's ou OF's, sem categorizar por eventos diurnos e noturnos, ocorridos entre as Regiões Metropolitanas de interesse (RMBH, RMRJ, RMSP). Os asteriscos em preto destacam as correlações que não possuem significância estatística (p-value maior que 0.05), as demais correlações possuem significância estatística com nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05).....	54
Figura 4.23: Boxplots para a temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de EET's para as diferentes fases do ENOS durante a estação do Verão (DJF). ....	57
Figura 4.24: idem Figura 4.23, porém considera os valores de Tmin das Regiões Metropolitanas analisadas no presente estudo.....	59
Figura 4.25: Evolução temporal da correlação de Spearman calculada entre os valores de temperatura (letra a para Tmax e letra b para tmin) e a carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO para cada ano no período de 2003 a 2021. Os asteriscos demarcam apenas as correlações sem significância estatística (valor de p-value acima de 0.05), as demais correlações apresentem significância estatística com nível de confiança de 95%. ....	61
Figura 4.26: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMBH, destacando os dias úteis, finais de semana e feriados, OC's diurnas e noturnas e OF's diurnas e noturnas, para dois períodos distintos:	

jan/2010 a fev/2022, com exceção do ano de 2020 (letras a e c); apenas o ano de 2020 (letras b e d). .....	63
Figura 4.27: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMRJ, destacando os dias úteis, finais de semana e feriados, OC's diurnas e noturnas e OF's diurnas e noturnas, para dois períodos distintos: jan/2010 a fev/2022, com exceção do ano de 2020 (letras a e c); apenas o ano de 2020 (letras b e d). .....	64
Figura 4.28: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMSP, destacando os dias úteis, finais de semana e feriados, OC's diurnas e noturnas e OF's diurnas e noturnas, para dois períodos distintos: jan/2010 a fev/2022, com exceção do ano de 2020 (letras a e c); apenas o ano de 2020 (letras b e d). .....	65
Figura 4.29: Comportamento de Tmax e Tmin durante o ano de 2020 em RMBH (letra a), RMRJ (letra b) e RMSP (letra c). As tarjas cinzas destacam o evento de OF generalizada ocorrida entre as regiões durante maio deste ano e o evento de OC extremo registrado entre setembro e outubro de 2020. As áreas preenchidas em vermelho e roxo destacam valores de Tmax e Tmin acima dos limiares CTX90pct e CTN90pct, respectivamente. Já as áreas destacadas em verde e lilás, indicam os valores de Tmax e Tmin abaixo dos limiares CTX10pct e CTN10pct, nesta ordem. ....	68
Figura 4.30: Comportamento da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante o ano de 2020. As linhas vermelha e verde indicam os limiares extremos baseados nos percentis 90 e 10, respectivamente. As tarjas cinzas destacam o evento de OF generalizada ocorrido em maio de 2020. ....	69
Figura 4.31: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica Normalizada do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMBH (letras a e b), RMRJ (letras c e d) e RMSP (letras e e f), destacando os dias úteis, finais de semana e feriados durante o ano de 2020, além de indicar os eventos de OF's e OC's em análise ocorridos simultaneamente entre as Regiões Metropolitanas de estudo.....	70
Figura 4.32: Compósitos para o Evento de OF generalizado entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 05 e 12 de maio de 2020. Na letra a, estão representadas as variáveis de HGT500 (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas), UV500 (barbelas) e T850 (shadded). Na letra b, estão representadas as variáveis ROC (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e	

linhas tracejadas indicam anomalias negativas) e ROL (shadded) à superfície. Já na letra c, há indicação das variáveis PREC (shadded) e UV850 (barbelas). E a letra d, representa os campos de T2M (shadded) e MSL (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas). ..... 73

Figura 4.33: Compósitos para os movimentos verticais da troposfera representados por W (letras a e b), além da estrutura vertical de TAR (letras c e d) para o evento de OF generalizado entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 05 e 12 de maio de 2020. Nas letras a e c, o perfil vertical da troposfera possui caráter meridional, centrada entre as longitudes de 40°O e 60°O, variando entre as latitudes de 50°S e 15°S. Nas letras b e d, o perfil vertical da troposfera possui caráter zonal, centrada entre as latitudes de 20°S e 26°S, variando entre as longitudes de 65°O e 27°O. .... 75

Figura 4.34: Comportamento de Tmax e Tmin durante o ano de 2020 em RMBH (letra a), RMRJ (letra b) e RMSP (letra c). As tarjas cinzas destacam o evento de OC generalizada ocorrido entre as regiões durante maio deste ano e o evento de OC extremo registrado entre 26 de setembro de 2020 e 10 de outubro de 2020. .... 78

Figura 4.35: Comportamento da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante o ano de 2020. As linhas vermelha e verde indicam os limiares extremos baseados nos percentis 90 e 10, respectivamente. A tarja cinza destaca o evento de OC generalizada ocorrido entre setembro e outubro de 2020. .... 79

Figura 4.36: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica normalizada do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMBH (letras a e b), RMRJ (letras c e d) e RMSP (letras e e f), destacando os dias úteis, finais de semana e feriados durante o ano de 2020. .... 81

Figura 4.37: Compósitos para o Evento de OC generalizada entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 26 de setembro e 10 de outubro de 2020. Na letra a, estão representadas as variáveis de HGT500 (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas), UV500 (barbelas) e T850 (shadded). Na letra b, estão representadas as variáveis ROC (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas) e ROL (shadded) à superfície. Já na letra c, há indicação das variáveis PREC (shadded) e UV850 (barbelas). E a letra d, representa os campos de T2M (shadded) e MSL (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas). 84

Figura 4.38: Compósitos para os movimentos verticais da troposfera representados por W (letras a e b), além da estrutura vertical de TAR (letras c e d) para o Evento de OC generalizada entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 26 de setembro e 10 de outubro de 2020. Nas letras a e c, o perfil vertical da troposfera possui caráter meridional, centrada entre as longitudes de 40°O e 60°O, variando entre as latitudes de 50°S e 15°S. Nas letras b e d, o perfil vertical da troposfera possui caráter zonal, centrada entre as latitudes de 20°S e 26°S, variando entre as longitudes de 65°O e 27°O. ....	86
Figura 4.39: Síntese dos principais aspectos relacionados a ocorrência da OF de maio de 2020. ....	97
Figura 4.40: síntese dos principais aspectos relacionados à ocorrência da OC de setembro/outubro de 2020. ....	100

A 1: Boxplots para a Temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Outono (MAM). ....	125
A 2: Boxplots para a Temperatura mínima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Outono (MAM). ....	126
A 3: Boxplots para a Temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Inverno (JJA). ....	127
A 4: Boxplots para a Temperatura mínima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Inverno (JJA). ....	128
A 5: Boxplots para a Temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Primavera (SON). ....	129

A 6: Boxplots para a Temperatura mínima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF"s e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Primavera (SON). .....	130
--	-----

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: órgãos nacionais responsáveis pelo gerenciamento, operação, planejamento, regulamentação, fiscalização e pesquisas do setor energético e elétrico do Brasil. ....	5
Tabela 4.1: Estatísticas gerais do comportamento da temperatura durante a OF simultânea ocorrida em RMBH, RMRJ e RMSP, entre 05 de maio de 2020 e 12 de maio de 2020. ....	67
Tabela 4.2: Estatísticas gerais do comportamento da temperatura durante a OC generalizada ocorrida em RMBH, RMRJ e RMSP, entre 26 de setembro de 2020 e 10 de outubro de 2020. ....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANBIMA – Associação Brasileira das Entidades dos Mercados Financeiro e de Capitais

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CDD – *Cooling Degree Days*

CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

CTX90pct – Limiar extremo climatológico baseado no percentil 90 para a Temperatura Máxima

CTN90pct – Limiar extremo climatológico baseado no percentil 90 para a Temperatura Mínima

CTX10pct – Limiar extremo climatológico baseado no percentil 10 para a Temperatura Máxima

CTN10pct – Limiar extremo climatológico baseado no percentil 10 para a Temperatura Mínima

DJF – trimestre Dezembro, Janeiro e Fevereiro

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Forecasts*

EET's – Eventos Extremos de Temperatura

ENSO – El Niño – Oscilação Sul

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FAB – Força Aérea do Brasil

HGT500 – Altura Geopotencial em 500hPa

ICEA – Instituto de Controle do Espaço Aéreo

ICU – Ilha de Calor Urbano

IBGE–Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

IPCC – International Panel on Climate Change

JJA – trimestre Junho, Julho e Agosto

MAM – trimestre Março, Abril e Maio

MMGD – Micro e Minigeração Distribuída

MW - Megawatts

MWmédio – Megawatts médio

OC – Onda de Calor

OF – Onda de Frio

ONS – Operador Nacional do Sistema

OMJ – Oscilação de Madden Julian

PIB – Produto Interno Bruto

PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar

PREC – Precipitação Acumulada

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

ROC – Radiação de Onda Curta

ROL – Radiação de Onda Longa

SBAF – Aeródromo Campo dos Afonsos

SBBH – Aeroporto de Belo Horizonte – Pampulha

SBCF – Aeroporto Internacional de Confins – Tancredo Neves

SBJR – Aeroporto de Jacarepaguá – Roberto Marinho

SBGL – Aeroporto Internacional Tom Jobim – RioGaleão

SBGR – Aeroporto Internacional de Guarulhos

SBMT – Aeroporto Campo de Marte

SBRJ – Aeroporto Santos Dumont

SBSC – Aeródromo de Santa Cruz

SBSP – Aeroporto de São Paulo - Congonhas

SE/CO – Subsistema Elétrico Sudeste/Centro-Oeste

SIN – Sistema Interligado Nacional

SON – trimestre Setembro, Outubro e Novembro

Tmax – Temperatura Máxima

Tmin – Temperatura Mínima

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

TWh – Terawatt-hora

TAR – Temperatura do Ar

T2M – Temperatura do Ar a 2 metros da superfície

T850 – Temperatura do Ar no nível de 850hPa

UV500 – Vento ao nível de 500hPa

UV850 – Vento ao nível de 850hPa

W – Velocidade Vertical

# 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as atividades antropogênicas intensificaram a emissão de gases de efeito estufa, potencializando os efeitos do aquecimento global e mudanças climáticas (IPCC, 2018, 2023; MUKHERJEE et al., 2024; RAWAT; KUMAR; KHATI, 2024), provocando elevação da temperatura média do ar em escala global, atingindo valores de 1,1°C acima ao comparar com o período Pré-Industrial, e acentuando eventos extremos de chuva e de temperatura (IPCC, 2023; ZHOU; YU; ZHANG, 2023). Neste aspecto, eventos como OC's têm se tornando cada vez mais frequentes, duradouros e intensos em escala global (ALIZADEH et al., 2022; DOMEISEN et al., 2022; LA SORTE; JOHNSTON; AULT, 2021; WU et al., 2023, 2021), assim como para diversas áreas do Brasil (CECCHERINI et al., 2016; FERON et al., 2019; GEIRINHAS et al., 2018a, 2018b, 2021). Neste contexto, os eventos de frio extremo, como OF's, estão se tornando menos comuns por todo o planeta (WU et al., 2021; ZHANG et al., 2022), mas para áreas do Brasil não foram detectadas mudanças significativas (CECCHERINI et al., 2016). No que diz respeito às projeções climáticas, os possíveis cenários, indicando o agravamento do aquecimento global, aumentando a frequência, duração e intensidade de eventos de OC's (AJJUR; ALGHAMDI, 2021; SHERMAN; LIN; MCELROY, 2022).

Adicionalmente, os modos de variabilidade climática podem auxiliar a entender efeitos conjunturais para a ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura, sendo que a variabilidade climática na América do Sul está amplamente relacionada a atuação de padrões de teleconexão atmosférica e oceânica em escala global, os quais modulam a distribuição espacial e temporal da precipitação e da temperatura (REBOITA *et al.*, 2021). Nesse sentido, o principal modo de variabilidade climática em escala global é o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), em que a sua fase positiva (El Niño) está relacionada com anomalias negativas (positivas) de precipitação (temperatura) no setor norte do Brasil e anomalias positivas (negativas) de precipitação (temperatura) na porção sul do país. Já a sua fase negativa (La Niña), os efeitos, em geral, são opostos a fase positiva do ENOS (DOS SANTOS, L. O. F. *et al.*, 2024; REBOITA *et al.*, 2021). Dessa maneira, as atividades de OC's e OF's também devem levar em consideração os efeitos conjunturais, como o modo de variabilidade ENOS.

Diante dessa perspectiva de OC's mais frequentes, há evidências sobre os impactos em diversos segmentos sociais, de infraestrutura e no meio ambiente, como: saúde pública – aumento de internações e ocorrência de óbitos em virtude do calor extremo (EBI et al., 2021; GARCIA-HERRERA et al., 2010; GEIRINHAS et al., 2019, 2020; KHOSLA; JANI; PERERA, 2021; KHRAISHAH et al., 2022; RYTI; GUO; JAAKKOLA, 2016; TRIGO et al., 2009); produção agrícola – perdas de culturas devido a períodos prolongados de calor (MARENGO et al., 2014; MAVI; TUPPER, 2020; FIORINI et al., 2024) e insegurança alimentar (KUMAR et al., 2018; MEHRABI et al., 2022; SEPPELT et al., 2022; YANG et al., 2024); consumo de energia elétrica – aumento da necessidade de uso de aparelhos de ar-condicionado pela população durante os períodos de calor intenso (SHERMAN; LIN; MCELROY, 2022; WANG; LU; HAN, 2023; ZUIN et al., 2023); impactos sobre a biodiversidade – alteração da dinâmica de ecossistemas (LAWLOR et al., 2024); eventos compostos de seca e de calor – agravamento de quadros de escassez hídrica (HE et al., 2022; XIONG; YANG, 2024); associação a ocorrência de incêndios (LIBONATI et al., 2022).

Os eventos de OF's devem ocorrer com menor frequência, mas também são verificados efeitos sobre os aspectos sociais, bem como infraestrutura e meio ambiente: saúde pública – hospitalizações, propagação de doenças e ocorrência de mortes por frio extremo (DU et al., 2022; GRIGORIEVA; REVICH, 2021; KHAN; BHATTARAI; CHEN, 2024; LÓPEZ-BUENO et al., 2021; PARLIARI; GIANNAROS; KEPPAS, 2022; ZENG et al., 2022), consumo de energia elétrica – a depender da região do planeta, há países que registram forte demanda por aquecimento (HU et al., 2025; JAFARPUR; BERARDI, 2021; ZHANG et al., 2024); impactos sobre a infraestrutura – isolamento de bairros, cidades, devido a ocorrência de frio extremo associados a nevascas provocando fechamento de rodovias, portos e aeroportos (HUANG et al., 2024; LECOMTE, 2023; RICCI; CASSON MORENO; COZZANI, 2023; WANG; WANG; SONG, 2024); dentre outros.

Dessa maneira, fica evidente a relevância do tema envolvendo OC's e OF's sobre diversos aspectos e regiões do globo, incluindo o Brasil. Diante disso, o setor elétrico é um dos segmentos desafiados e impactados por OC's e OF's, provocando alterações no consumo de energia elétrica. No caso do Brasil, o sistema elétrico, chamado de Sistema Interligado Nacional (SIN) é dividido em quatro subsistemas (Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte) e é formado por instalações de geração e transmissão que garantem o suprimento de energia elétrica de todas as regiões do país de forma interligada (ONS, 2025c). Dessa forma,

EET's podem afetar a carga de energia elétrica do SIN, que consiste na potência elétrica média requerida pelo sistema elétrico por um determinado intervalo de tempo, sendo que no caso do SIN, o Subsistema Elétrico Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO) exige maior parte da potência média do sistema elétrico nacional (ONS, 2024), com forte participação dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (EPE, 2023)

### **1.1. Objetivos**

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo central determinar as relações entre a carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO e os valores de temperatura máxima e mínima ( $T_{max}$  e  $T_{min}$ , respectivamente) das Regiões Metropolitanas de Belo Horizonte (RMBH), Rio de Janeiro (RMRJ) e de São Paulo (RMSP). Adicionalmente, há finalidade de realizar a identificação e caracterização climática dos eventos de OC's e OF's para cada região metropolitana entre 1980 e 2021, avaliando a frequência, intensidade e duração desses eventos. Como objeto complementar de estudo, estima-se investigar as relações dos valores de temperaturas das regiões metropolitanas e as fases do ENOS. Por fim, analisar impactos de eventos de OC's ou OF's registradas simultaneamente nas áreas de estudo sobre a carga de energia elétrica do subsistema SE/CO, abordando a caracterização climática e sinótica por meio de compósitos.

É importante ressaltar que as RMBH, RMRJ e RMSP foram selecionadas devido a representatividade populacional e econômica dentro do contexto do Subsistema SE/CO. Sendo a RMBH com mais de 5 milhões de habitantes e Produto Interno Bruto (PIB) próximo a 200 bilhões de reais, RMRJ com 12 milhões de habitantes e PIB com cerca de 500 bilhões de reais e RMSP com mais de 20 milhões de habitantes e PIB em torno de 1,14 trilhões de reais (IBGE, 2023). Por fim, este estudo pode servir como material técnico para a avaliação de situações de estresse para a operação do SIN e planejamento de órgãos governamentais e regulatórios a fim de projetar condições futuras, especialmente no que diz respeito à tendência de aquecimento e necessidade de garantir o atendimento elétrico para toda a população.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 apresenta-se a revisão da literatura, apresentando estudos recentes que discutem as principais implicações dos EET's sobre o setor elétrico em diversas áreas do globo. No Capítulo 3, estão descritos

os dados e métodos utilizados no estudo. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Finalmente no Capítulo 5 estão as conclusões e os principais considerações sobre o presente estudo

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Características do Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil**

De acordo com (ONS, 2025c), o SIN é um grande sistema hidro-termo-eólico, com forte predominância de usinas hidroelétricas e é responsável pelas instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para todas as regiões do Brasil, sendo interconectadas eletricamente. A operação do SIN envolve a utilização modelos complexos de otimização de recursos energéticos e que estão sob a coordenação e controle do Operador Nacional do Sistema (ONS), sendo fiscalizado e regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANA, 2025). A Tabela 2.1 indica os órgãos responsáveis pelas ações direcionadas ao setor energético do Brasil, atuando no gerenciamento, operação, planejamento, regulamentação, fiscalização e pesquisas sobre o setor energético e elétrico brasileiro (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Tabela 2.1: órgãos nacionais responsáveis pelo gerenciamento, operação, planejamento, regulamentação, fiscalização e pesquisas do setor energético e elétrico do Brasil. Fonte: (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

<b>Órgão</b>	<b>Atribuições</b>
Ministério de Minas e Energia (MME)	Órgão Federal responsável pela condução das políticas energéticas do Brasil
Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	Responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica
Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)	Responsável pela formulação de políticas e diretrizes de energia que assegurem o suprimento de insumos energéticos a todas as áreas do Brasil
Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)	Acompanha e analisa a continuidade e a segurança de suprimento elétrico em todo território Nacional
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)	Responsável por viabilizar as operações de compra e venda de energia em todo o país
Empresa de Pesquisa Energética (EPE)	Realiza estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético
Operador Nacional do Sistema (ONS)	Responsável por operar, supervisionar e controlar a geração de energia elétrica no SIN e por administrar a rede básica de transmissão de energia elétrica no Brasil

Uma das principais características do SIN é a vocação natural para a geração de energia elétrica utilizando recursos hídricos. Com relação à capacidade instalada do SIN (ONS, 2025a), atualmente gira entorno de 234.778MW e a Figura 2.1 exemplifica a composição da capacidade instalada por fontes de geração, demarcando a expressividade de Hidroelétricas e de outras fontes renováveis como Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), Eólica e Solar.

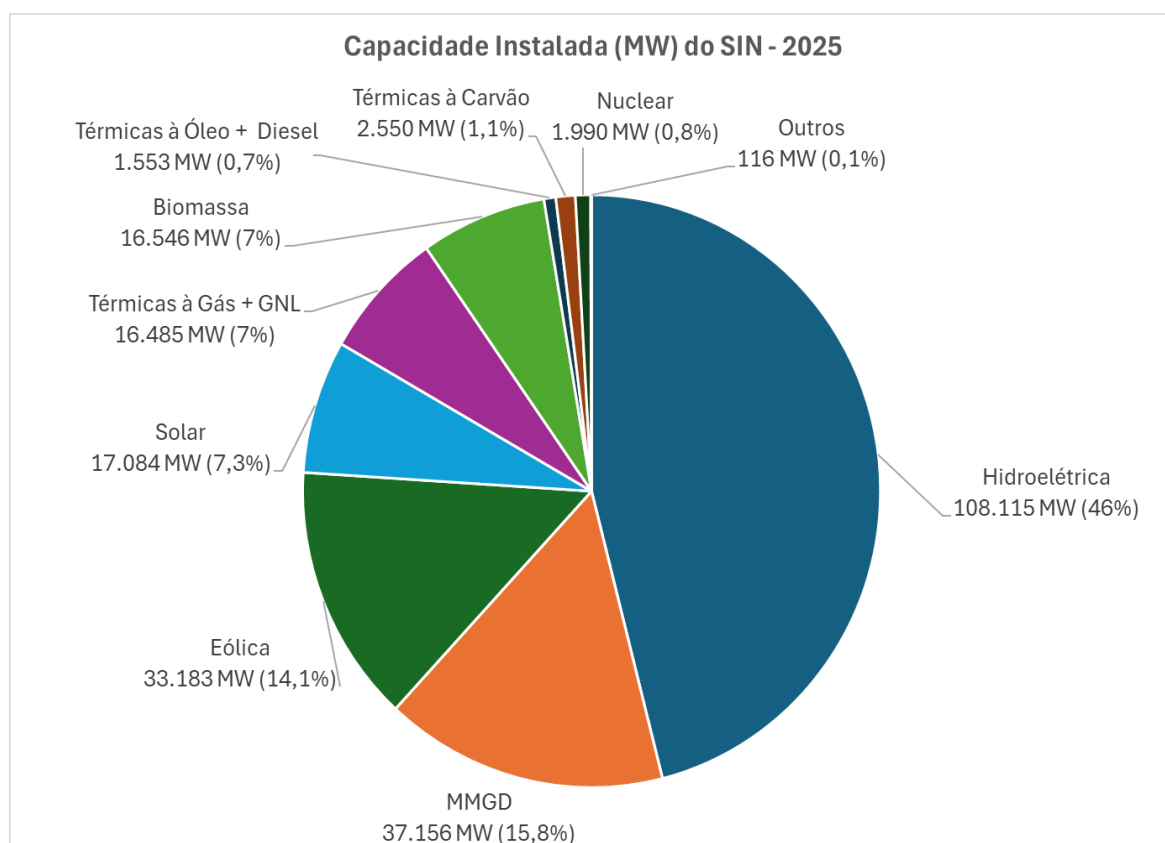


Figura 2.1: Capacidade instalada por fontes de geração - SIN 2025. Fonte: (ONS, 2024).

Outra característica é a dimensão continental do SIN, representando grande complexidade operacional no que diz respeito à transmissão de energia elétrica. Mesmo diante dessa complexidade, o Brasil conta com uma extensa malha de Linhas de Transmissão (LT's), que conta atualmente com 200.015 km (ONS, 2025a), para garantir o máximo aproveitamento de recursos energéticos espalhados pelo Brasil, maximizando até aspectos sazonais hidroclimáticos de diferentes áreas do Brasil (ONS, 2020). A Figura 2.2 demonstra as LT's em operação atualmente no SIN, que permite a transferência de excedentes energéticos de diversas áreas do país, sendo um recurso importante para a otimização de reservatórios de usinas hidroelétricas e auxiliando a garantir o suprimento de energia elétrica para todo o país.

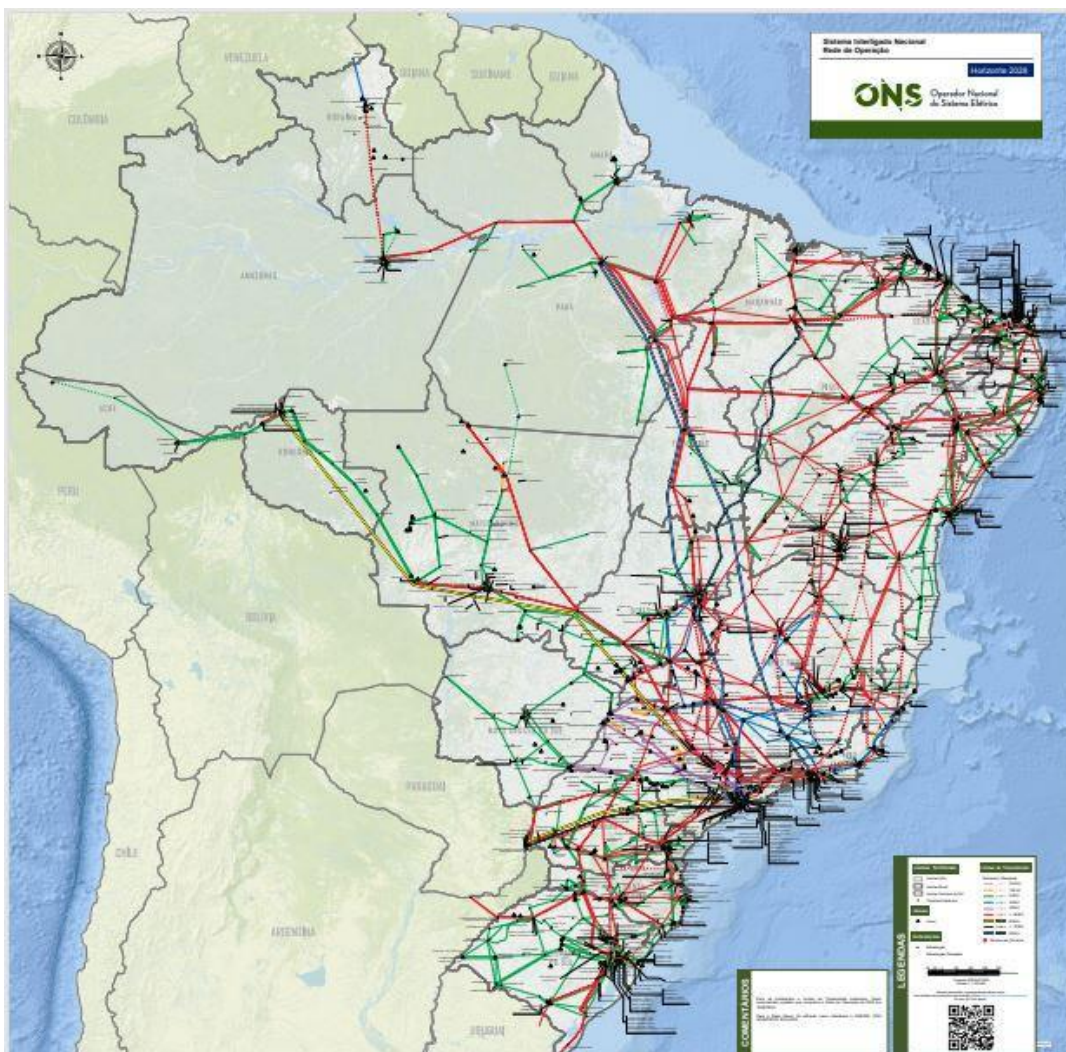


Figura 2.2: Representação atual do Mapa Geométrico do Sistema Interligado Nacional.  
Fonte: (ONS, 2025b).

Outro aspecto relevante de um país e sistema elétrico de dimensões continentais é a sazonalidade dos aproveitamentos energéticos como Hidroelétricas, Eólicas e Usinas Solares, de forma que uma fonte de geração seja mais atuante em determinado período do ano em relação a outro tipo de fonte de geração, representando a complementariedade energética do SIN. Nesse sentido, para garantir o máximo de aproveitamento dos recursos energéticos e garantir o intercâmbio de excedentes energéticos entre as regiões do país, o SIN foi dividido em quatro Subsistemas Elétricos (ONS, 2020) e de acordo com a Figura 2.3:

- 1) Subsistema SE/CO - composto pelos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rondônia, Acre e o Distrito Federal;

- 2) Subsistema Sul (S) – composto pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná;
- 3) Subsistema Nordeste (NE) – composto pelos estados da Bahia, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe;
- 4) Subsistema Norte (N) – composto pelos estados do Amazonas, Amapá, Pará, Roraima, Tocantins e Maranhão.

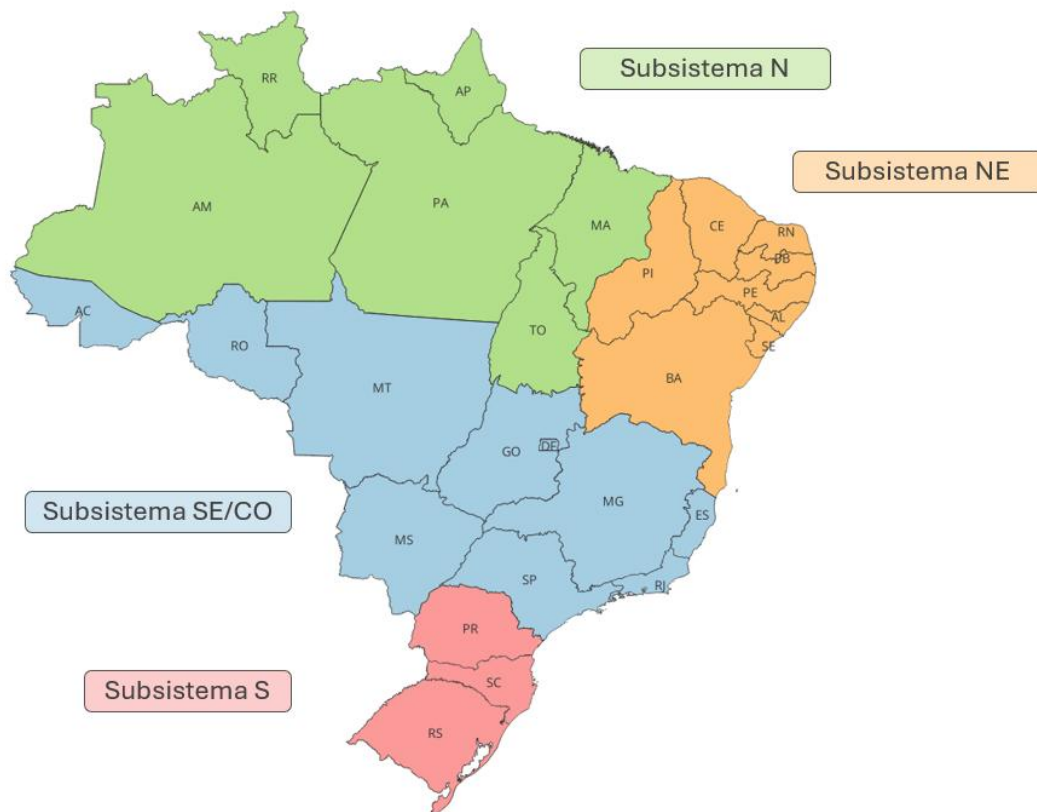


Figura 2.3: Representação dos Subsistemas Elétricos do SIN e os estados que os compõem, respectivamente.

No aspecto operativo do SIN, a carga de energia elétrica é fundamental para toda a operação do SIN visto que representa a potência elétrica média solicitada pelo SIN por um determinado intervalo de tempo (ONS, 2025c). Ou seja, é a variável que basicamente traduz o quanto de energia está sendo demandada em uma hora, dia, semana, mês ou ano. Além disso, vale ressaltar a forte influência de fatores climáticos, efeitos de calendário (como feriados e finais de semana) e socioeconômicos, sobre o comportamento da carga de energia elétrica em âmbito nacional e até em aspectos mais regionais (DOS SANTOS, L. C. *et al.*, 2024; I C. FIGUEIRÓ *et al.*, 2018; SERRANO *et al.*, 2024).

Neste aspecto, a Figura 2.4 exibe os valores médios de carga de energia elétrica para cada subsistema elétrico que compõem o SIN para o ano de 2024 e nota-se participação expressiva do Subsistema SE/CO representando 57% da Carga do SIN, seguido dos Subsistemas S (18%), NE (16%) e N (9%).

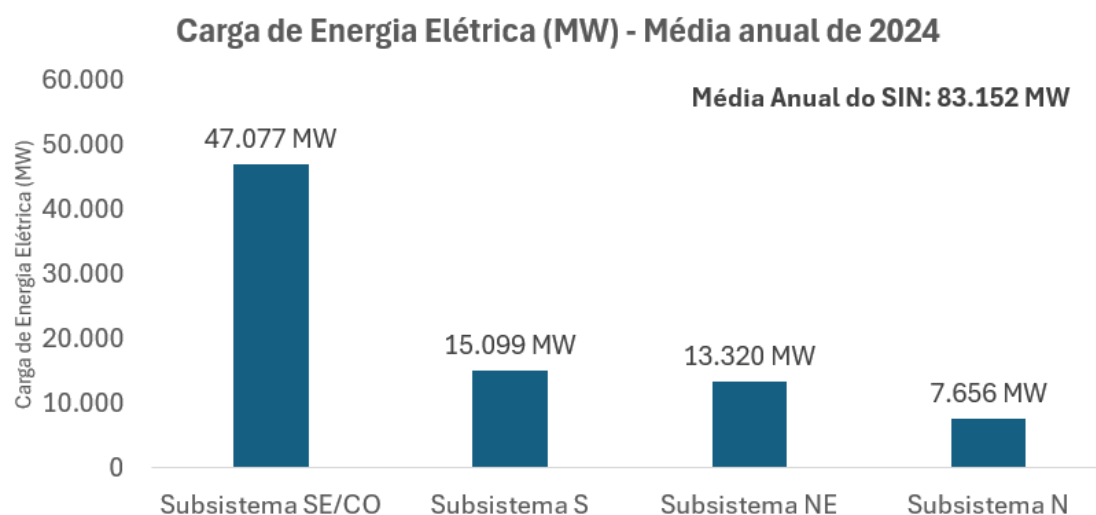


Figura 2.4: Média da carga de energia elétrica durante o ano de 2024 para os Subsistemas Elétricos do SIN. Fonte: (ONS, 2024).

## 2.2. Eventos Extremos de Temperatura e seus Impactos sobre Sistema Elétricos

Nesta seção, serão apresentadas evidências, encontradas por estudos anteriores (SCHAEFFER *et al.*, 2012), de como EET's impactam diversos segmentos de Sistemas Elétricos, como a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, para diversas regiões do planeta. Além disso, serão apresentados casos de alterações na carga ou demanda de energia elétrica, assim como casos de alterações na potência elétrica em períodos de forte estresse térmico devido a ocorrência de OC's e OF's.

Neste contexto, a geração de energia elétrica por usinas nucleares e usinas termelétricas podem ser impactadas devido a ocorrência de OC's, que eventualmente podem produzir aumento da temperatura da água de corpos hídricos que são usados para o arrefecimento destes tipos de usinas, forçando a redução de produção de energia elétrica em até 16% na Europa (VAN VLIET *et al.*, 2012) e 38% para os Estados Unidos (SATHAYE *et al.*, 2013), sendo que 40% das usinas nucleares da Europa já tiveram problemas de refrigeração dos reatores nucleares devido a estes períodos de estresse térmico, colocando o atendimento de demanda da energia elétrica em risco (RÜBBELKE; VÖGELE, 2011).

Do ponto de vista da geração de energia elétrica por fontes limpas e renováveis, a geração fotovoltaica é impactada negativamente pelas temperaturas elevadas e OC's, devido às características dos equipamentos que possuem limitações físicas, provocando decaimento da performance e necessitando de resfriamento (DUBEY; SARVAIYA; SESHADRI, 2013; SA; LUCENA, 2021). No caso de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, há perda de eficiência em um cenário de temperaturas elevadas, limitando a potência de transformadores de energia elétrica (WARD, 2013). Adicionalmente, provoca um aumento da resistência das linhas de transmissão em redes elétricas (RADEMAEKERS et al., 2011), já que as linhas de transmissão são cobertas por fios de alumínio que se expandem com o calor, resultando em diminuição do fluxo de energia elétrica (MCEVOY; AHMED; MULLETT, 2012). Nesse sentido, a capacidade dos transformadores decai em cerca de 1% e a resistência das linhas de transmissão aumenta por volta de 0,4% para cada 1°C. De modo geral as perdas de energia elétrica podem aumentar em 1% a cada 3°C, incrementando as perdas técnicas das redes que giram em torno de 8% e que ocorrem devido às limitações dos materiais utilizados (RADEMAEKERS et al., 2011).

Adicionalmente, é possível verificar os impactos da elevação ou redução da Temperatura associados a casos de EET's, provocando alterações na demanda de energia elétrica ou de potência elétrica, mesmo ao considerar as particularidades de cada país, clima local e aspectos sociais.

Nesse ponto, há estudos que indicam demanda de energia elétrica além do esperado em períodos de calor extremo, como o verificado para a Europa, marcado pela ocorrência de OC's intensas e duradouras durante o verão de 2015 (MECKING et al., 2019; TOMCZYK; BEDNORZ, 2019). Neste caso, alguns países da União Europeia registraram forte elevação da carga de energia elétrica, como a França que chegou a registrar cerca de 24TWh residuais, a Alemanha com cerca de 23TWh residuais, Reino Unido com valores próximos a 22TWh e Polônia com valores na faixa de 17TWh (GALLO CASSARINO; SHARP; BARRETT, 2018).

Outro evento de relevância foi a OC ocorrida sobre a Europa durante o ano de 2003 (BLACK et al., 2004; GARCIA-HERRERA et al., 2010). Durante este evento, na França foi observado que a temperatura da água de corpos hídricos que são usados para resfriamento dos reatores nucleares chegou até 30°C, com cerca de 6°C acima do limiar considerado

seguro para a operação de usinas nucleares (AIVALIOTI, 2015). Esse aumento da temperatura da água indisponibilizou parte das usinas nucleares do país e reduziu a capacidade de geração em 4000MW, equivalente a quatro usinas nucleares, totalizando 17 reatores nucleares forçados a desligar, visto que o arrefecimento destes foi inviabilizado naquele período. Neste caso, durante o verão, a redução total de energia nuclear foi de 5,3TWh (KOPYTKO; PERKINS, 2011). Para o mesmo evento, foi observado na Espanha um pico de demanda de energia elétrica em agosto, registrando valores 13% acima do que foi registrado no ano anterior (LÓPEZ ZAFRA; SÁNCHEZ DE TEMBLEQUE; MENEUFERRER, 2005).

Em 2002, durante o mês de julho, na Califórnia foi registrado um evento de OC, que provocou recorde de demanda de energia elétrica, alcançando a marca de 52.863MW em único dia para o contexto da época, sendo que durante o verão (período histórico de maior demanda), a demanda típica diária varia entre 40.000 e 45.000MW, gerando situações críticas para o fornecimento de energia elétrica e impactando em desabastecimento de algumas regiões por algumas horas, ou até mesmo durante alguns dias (VINE, 2012).

Na Substistema de Bali da Indonésia, foi conferido que a demanda de pico de energia elétrica, ao comparar dias/noites quentes e frio, pode aumentar cerca de 100MW, representando cerca de 12% da demanda de pico em 2017, afetando diretamente a operação deste subsistema que precisa acomodar qualquer variação mais abrupta em virtude da elevação expressiva da demanda em dias quentes (HANDAYANI; FILATOVA; KROZER, 2019).

Em contrapartida, eventos de frio extremo também impactam sistemas de redes elétricas de diferentes formas. Sendo que para os EUA, entre 1984 e 2006, cerca de 5,5% dos eventos de *blackout* estiveram relacionados a períodos de frio extremo e que, em média, provocou déficit do atendimento de energia elétrica na ordem de 542MW, afetando entorno de 150 mil consumidores (CAMPBELL, 2012). Como exemplo, durante fevereiro de 2021, uma intensa OF associada a ocorrência de tempestades de neve, afetou o estado do Texas nos EUA. Durante este episódio de frio extremo, a demanda por energia elétrica alcançou valores extremamente elevados devido a necessidade de aquecimento de residências, prédios, indústrias, dentre outros. Nesse sentido, o sistema elétrico local não foi capaz de atender toda a demanda do estado, registrando interrupções e reduzindo a demanda de

energia elétrica na ordem de 30GW e gerando *blackouts* (apagões), desabastecendo cerca de 4.5 milhões de pessoas (BUSBY et al., 2021).

Para a China, também há evidências de que eventos de OF ou de frio extremo, possuem capacidade para provocar desvios na demanda por energia elétrica. Como no caso de 2021, onde uma OF intensa provocou variações em diversas áreas do país, com regiões mais ao sul da China apresentando variações na ordem de  $0,533\text{GW } ^\circ\text{C}^{-1}$ , já regiões mais ao norte registraram desvios na faixa de  $0,139\text{GW } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Sendo que para este mesmo período foi observado redução da geração eólica de 110GW para 54GW devido a redução da velocidade do vento durante o evento de frio extremo, assim como redução da geração solar por conta da maior cobertura de nuvens (LIU et al., 2022).

Outros estudos investigaram essas relações na tentativa de traçar limiares ou valores de temperatura que representem situações de elevação da demanda por energia elétrica e maior resposta da operação de sistemas elétricos. Para a maioria dos países com clima temperado, normalmente localizados mais próximos a latitudes médias, foram observadas relações que podem ser representadas por relações em formato de “U-Shape”. Essas relações podem ser caracterizadas por funções de segundo grau, como no caso da Austrália (AHMED; MUTTAQI; AGALGAONKAR, 2012), onde a temperatura do ar acima de  $35^\circ\text{C}$  e abaixo de  $15^\circ\text{C}$  indicam aumento de demanda. Para a Espanha, ao considerar valores de temperatura do ar ponderada pela densidade populacional, foi constatado que dias com valores abaixo de  $10^\circ\text{C}$  e acima de  $25^\circ\text{C}$  indicam potencial para variações mais bruscas de demanda de energia elétrica (PARDO; MENEU; VALOR, 2002). Para a Itália, essas variações mais abruptas podem ser observadas em dias em que a temperatura média do ar fica abaixo de  $7,5^\circ\text{C}$  e acima de  $22,5^\circ\text{C}$  (SCAPIN et al., 2016). Já no caso da Grécia, picos de demanda de energia elétrica mais significativos podem ocorrer quando a temperatura média do ar atinge valores abaixo de  $13^\circ\text{C}$  ou ultrapassando a marca de  $23^\circ\text{C}$  (MIRASGEDIS et al., 2006).

Já para países mais próximos a latitudes subtropicais, a resposta da demanda é mais expressiva em função do calor ou temperaturas elevadas. Tendo em vista que são áreas naturalmente mais quentes, o conforto térmico depende de aparelhos de ar-condicionado, em virtude do acúmulo de *Cooling Degree Days* (CDD), métrica que consiste no número de graus-dia para resfriamento, sendo utilizada para estimar a demanda por resfriamento

(BIARDEAU et al., 2020). Por exemplo, no caso da cidade de Delhi na Índia, a relação entre temperatura do ar e a demanda por energia elétrica também apresenta formato “U-Shape”, porém a resposta da demanda é mais expressiva em dias de calor, com valores de temperatura ultrapassando a marca de 30°C (GUPTA, 2012). Este padrão é similar para a região da Jordânia, onde temperaturas acima de 20°C já apresentam potencial para elevação da demanda, e valores acima de 30°C estão associados a picos mais significativos (ALMUHTADY et al., 2019). Já para outros locais do planeta com clima mais quente, as relações entre a temperatura do ar e a demanda de energia elétrica apresentam forma próxima a regressão linear, como no caso do Paquistão, onde temperaturas mais elevadas, com valores a partir de 35°C, indicam maior pico de demanda, e valores abaixo de 25°C estão relacionados com menor demanda de energia elétrica (ALI; IQBAL; SHARIF, 2013).

Em regiões da América do Sul, há evidências de que eventos de OC's e OF's geram situações de estresse para a distribuição de energia elétrica para a Região Metropolitana de Buenos Aires. Durante o período entre 1971 e 2013 houve registro de três *blackouts* em decorrência de episódios de frio extremos e vinte *blackouts* devido ao calor extremo associado a eventos de OC's. Os eventos relacionados ao frio extremo são mais frequentes durante a estação do ano mais fria, na qual há registro do aumento de demanda de energia elétrica para aquecimento domiciliar e de edifícios (SANTÁGATA et al., 2017).

Para o Brasil, VASQUEZ et al., (2021) encontrou elevações expressivas da demanda de energia elétrica em meses em que foram marcados pela ocorrência de OC's, como no caso de fevereiro de 2010, no qual foi observado uma demanda 9,7% superior no Subsistema SE/CO em comparação com o mesmo mês do ano anterior. Outro ano marcante foi 2014, no qual uma OC ocorrida em fevereiro provocou elevação da demanda em 12,2% no Subsistema SE/CO e 26,5% no Subsistema S em comparação com fevereiro de 2013. Ainda sobre 2014, outro evento de OC ocorrido em outubro, foi capaz de elevar a demanda de energia elétrica em 13,4% no Subsistema SE/CO em comparação com outubro de 2013. O ano de 2019 também se destaca nesse sentido, com ocorrências de OC's em janeiro e setembro, foram capazes de elevar a demanda de energia elétrica do Subsistema SE/CO em 8,3% e 13,4%, respectivamente, em comparação com os mesmos meses do ano anterior. Além disso, há estudos que sinalizam para o aumento da demanda de energia elétrica devido a maior necessidade de uso de aparelhos de ar-condicionado em virtude do aquecimento global (BEZERRA et al., 2021; PAVANELLO et al., 2021). Em termos de geração de

energia elétrica por fonte solar, ao considerar os cenários projetados de elevação média das temperaturas do RCP (IPCC, 2023), há indicativos que queda de performance dos painéis solares e impactando em redução do potencial econômico do uso dessa fonte (SANTOS; LUCENA, 2021). Adicionalmente, há evidências que o cenário de aquecimento global e seus impactos têm afetado energia gerada por usinas hidroelétricas, necessitando de maior participação de usinas de fontes renováveis (solar e eólica), assim como energias por fontes “sujas”, como termelétricas (HUNT.; STILPEN; DE FREITAS, 2018; LUCENA et al., 2018), sendo que as projeções indicam o agravamento deste cenário (KÖBERLE et al., 2020). Outro aspecto a ser considerado, é a maior frequência de eventos compostos de seca e calor sobre regiões que afetam grandes centros populacionais do Brasil e bacias hidrográficas (GEIRINHAS *et al.*, 2021), de forma que usinas hidrelétricas no Brasil são impactadas por esse tipo de evento (CUARTAS *et al.*, 2022). Em um aspecto geral, para o Brasil não há muitos estudos realizados avaliando o impacto direto de casos de OC's e OF's sobre o SIN, além de não haver referências suficientes para indicar objetivamente as relações históricas desses eventos e a carga de energia elétrica nacional.

### **3. DADOS E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de Estudo**

No presente trabalho, o foco da análise de EET's foi sobre as RMBH, RMRJ e RMSP. Nesse sentido, é importante ressaltar a importância dessas regiões em termos de população, sendo que a RMSP concentra cerca de 20 milhões de habitantes, 12 milhões de habitantes na RMRJ e próximo de 5 milhões para a RMBH. Além disso, destaca-se a forte atividade econômica envolvendo as áreas de estudo, com Produto Interno Bruto (PIB) aproximado de R\$1.6 trilhões para RMSP, R\$413 milhões para RMRJ e R\$194 milhões para RMBH. Diante desses fatores, as regiões em questão possuem relevância na demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) e, sobretudo, no Subsistema SE/CO, que engloba todas as Unidades Federativas da Região Administrativa do Sudeste, Centro-Oeste, além dos estados do Acre e de Rondônia, que administrativamente estão inseridos na Região Norte do Brasil.

De acordo com ALVARES et al. (2013), as Regiões Metropolitanas em questão estão inseridas em domínios climáticos que, embora com nuances regionais, compartilham características tropicais e subtropicais marcadas por sazonalidade pluviométrica e térmica. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, RMBH apresenta predominantemente clima tropical de altitude (Cwa), caracterizado por verões quentes e úmidos, com chuvas concentradas entre outubro e março, e invernos secos e amenos. Já RMRJ está inserida majoritariamente no domínio do clima tropical úmido (Aw), com verões muito quentes e chuvosos, influenciados pela umidade oceânica, e invernos mais secos, porém ainda relativamente úmidos nas áreas próximas ao litoral. Por sua vez, RMSP apresenta clima subtropical úmido (Cfa), com verões quentes e úmidos e invernos mais frios e secos, sendo a estação seca menos marcada do que em RMBH. No verão, as três regiões experimentam elevadas temperaturas médias (acima de 22 °C) e altos volumes de precipitação, associados à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e de sistemas convectivos locais. No outono, observa-se uma transição com redução gradual das chuvas e leve declínio térmico. O inverno é mais seco e ameno nas três regiões, embora massas de ar frio possam provocar quedas bruscas de temperatura, especialmente em São Paulo. Na primavera, ocorre uma rápida elevação das temperaturas e o retorno das chuvas, marcando o início da estação chuvosa.

Por meio da Figura 3.1, estão destacadas as áreas que correspondem a RMBH, RMRJ e RMSP, inseridas no Subsistema SE/CO. Enfim, as estações meteorológicas utilizadas no presente estudo e dentro do domínio da RMBH são representadas pelos triângulos pretos, já para RMRJ são indicadas pelos triângulos vermelhos e para RMSP estão sinalizadas pelos triângulos azuis.

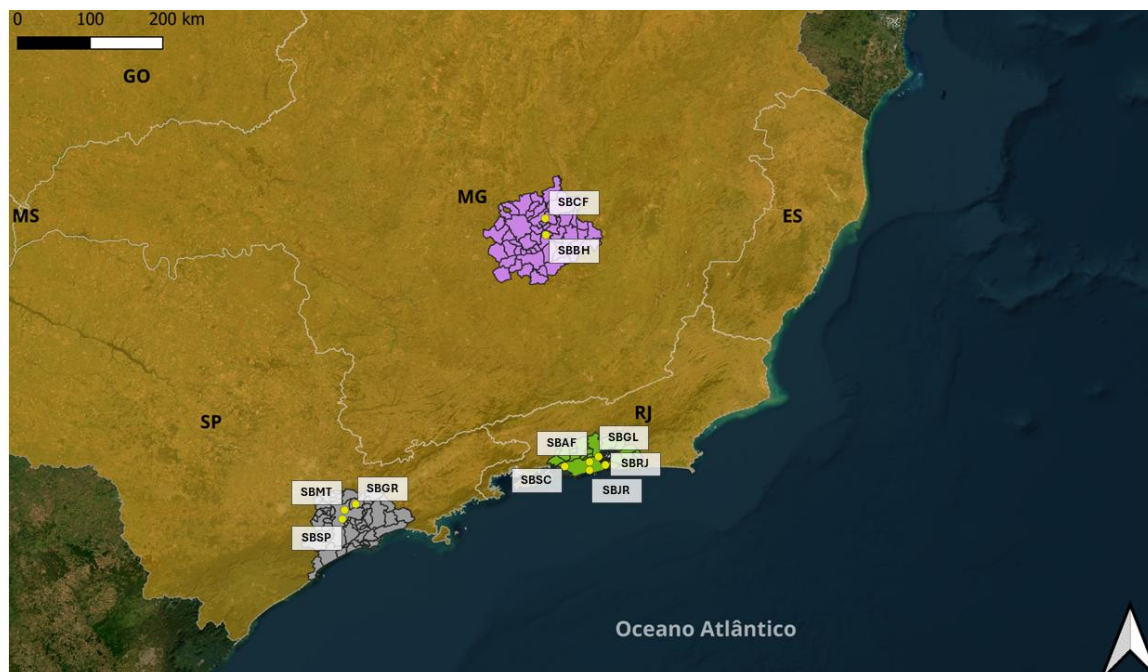


Figura 3.1: Representação da e RMBH, RMRJ e RMSP, inseridas no Subsistema SE/CO, destacando as estações meteorológicas utilizadas no presente estudo.

### 3.2. Dados

Neste estudo, foram utilizados dados mensais da demanda total e por classe de consumo (Industrial, Residencial, Comercial e outros) de energia elétrica por Unidade Federativa, provenientes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), referente ao ano de 2022 para introduzir o contexto mais recente sobre os padrões de consumo de energia elétrica entre os subsistemas e a fim de representar graficamente a participação da demanda de energia elétrica dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, frente ao Subsistema SE/CO.

Adicionalmente, foram utilizados dados diários de carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS, 2023), através da plataforma Histórico da Operação, com período de janeiro de 2003 a fevereiro de

2022. Os dados de carga de energia elétrica foram separados em dias úteis e dias não úteis, que engloba datas de finais de semana, além de feriados nacionais, utilizando dados da Associação Brasileira das Entidades dos Mercados Financeiro e de Capitais (ANBIMA, 2023), a fim de segregar e avaliar os impactos de EET's levando em consideração fatores de calendário que provocam redução e/ou aumento da carga de energia elétrica em decorrência da menor atividade econômica e circulação populacional no que tange atividades profissionais (ALVES, 2008; ARAUJO, 2013).

Já os dados de Tmax e Tmin são provenientes das estações meteorológicas de superfície provenientes do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA, 2023) da Força Aérea do Brasil (FAB), com período de 1980 a 2022. Para a RMBH, foram adotados os dados das estações localizadas no Aeroporto de Belo Horizonte/Pampulha – Carlos Drumond de Andrade (SBBH) e no Aeroporto Internacional de Confins – Tancredo Neves (SBCF). Já para a RMRJ, foram considerados dados das estações dispostas no Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim – Rio Galeão (SBGL), Aeroporto Santos Dumont (SBRJ), Aeroporto Jacarepaguá - Roberto Marinho (SBJR), Aeródromo Campo dos Afonsos (SBAF) e no Aeródromo de Santa Cruz (SBSC). Já para a RMSP, adotou-se os dados das estações meteorológicas de superfície localizadas no Aeroporto de Congonhas (SBSP), Aeródromo Campo de Marte (SBMT) e no Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR). Estes conjuntos de dados meteorológicos serão utilizados na detecção de Eventos de OC's e OF's, cuja metodologia será explanada na próxima seção.

Além disso, foram utilizados dados da reanálise ERA5 (BELL *et al.*, 2021), com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , disponibilizados pelo *European Centre for Medium-Range Forecasts* (ECMWF), abrangendo o período de 1980 a 2022. Neste estudo, dados ERA5 com resolução temporal horária foram usados para investigação de EET's e com resolução mensal foram utilizados para traçar perfis climatológicos, considerando as seguintes variáveis: Altura Geopotencial no nível de 500 hPa (HGT500), Vento no nível de 500 hPa (UV500), Temperatura do Ar no nível de 850 hPa (T850), Vento no nível de 850 hPa (UV850), Precipitação Acumulada (PREC), Radiação de Onda Longa à superfície (ROL), Radiação de Onda Curta à superfície (ROC), Temperatura do Ar a 2 metros (T2M) e Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM). Adicionalmente, as variáveis de Velocidade Vertical (W) e Temperatura do Ar (TAR) também foram utilizadas neste estudo, seguindo as mesmas características de resolução espacial e temporal comentadas anteriormente,

porém, nesse caso, para essas variáveis serão considerados seus dados por níveis de pressão (de 1000hPa a 200hPa).

Por fim, neste estudo, foram utilizados dados do Índice ONI (*Oceanic Niño Index*), sendo a principal métrica adotada para o monitoramento do modo de ENOS, principal métrica que permitindo a classificação das fases do ENOS (neutralidade, fase fria – La Niña, fase quente – El Niño), baseado em anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da região central do Oceano Pacífico Equatorial. Esses dados possuem resolução trimestral, com período de 1980 a 2022, disponibilizados pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2023).

### **3.3. Metodologia**

#### **3.3.1 Caracterização e Análise dos Eventos de OC's e OF's**

Para a detecção e definição de OC's, será adotado o método utilizado por GEIRINHAS et al. (2018b). A metodologia consiste na sequência de 3 ou mais dias com Tmax ou Tmin acima de um limiar climatológico calculado com base em valores diários do percentil 90 de cada variável em relação ao período de disponibilidade de dados, suavizados por um filtro de média móvel com janela de 15 dias centrado no dia em questão, respectivamente CTX90pct e CTN90pct. Similarmente para eventos de OF's, adaptou-se o mesmo método e definição adotados para OC's, porém com valores abaixo do limiar climatológico diário baseado no percentil 10, nomeado por CTX10pct para Tmax e CTN10pct para Tmin. Vale ressaltar que foi utilizado o período de 1981 a 2010 para o cálculo dos limiares climatológicos baseados em percentis. Adicionalmente, vale comentar que adoção deste critério baseado em percentis não são restritos a características locais; ou seja, são facilmente adaptados para outros locais em qualquer região do globo, viabilizando a aplicação do método para diferentes realidades e base de dados.

Ainda seguindo os critérios adotados pelo estudo de referência sinalizado anteriormente, a intensidade dos eventos de OC's e OF's foi classificada de acordo com as respectivas persistências ou duração; ou seja, é considerado um evento moderado aquele que perdura por 3 dias, um evento severo persiste por 4 a 6 dias e casos classificados como extremos são atribuídos a eventos com duração superior a 6 dias. A Figura 3.2 sumariza todo o procedimento e os passos envolvidos na detecção e definição dos EET's, destacando que

esse método foi aplicado para as bases de dados relativos a cada Região Metropolitana abordada neste estudo (RMBH, RMRJ e RMSP).

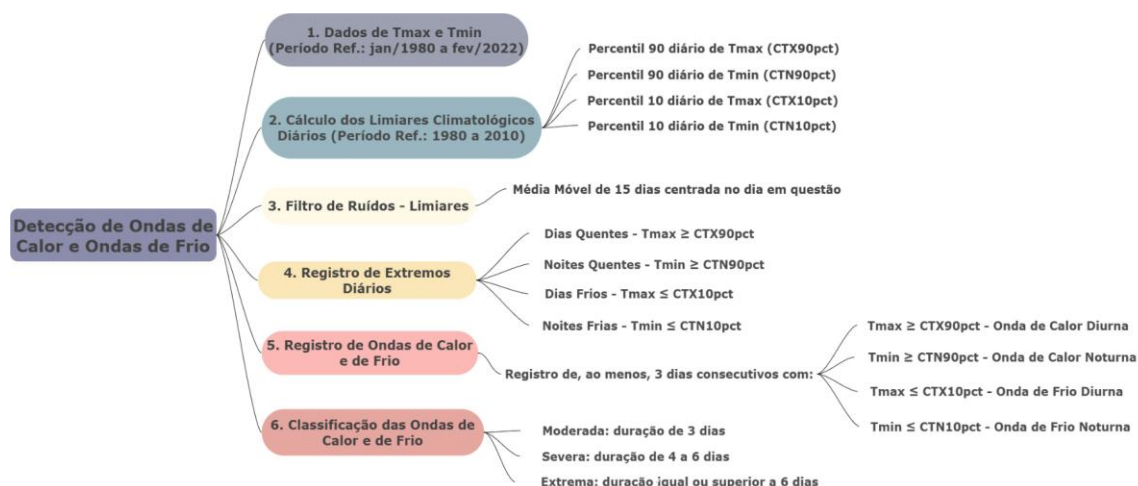


Figura 3.2: Fluxograma indicando passos do método para detecção e definição de OC's e OF's, aplicados para a base de dados de RMBH, RMRJ e RMSP.

Para a caracterização dos eventos de OC's e OFs de cada Região Metropolitana, foi considerado o número total de casos por estações do ano, buscando investigar padrões sazonais dos eventos em si e entre as regiões investigadas. Em seguida, com base no histórico dos casos de OC's e OF's detectados para RMBH, RMRJ e RMSP, foi contabilizado o total de dias por ano (entre 1980 e 2022) com a ocorrência desses eventos em cada região, bem como o total de casos discretizados pela sua intensidade (Moderado, Severo ou Extremo), objetivando mapear aumento ou redução da atividade desses EET's assim como avaliar se há mais ou menos ocorrências de casos de maior intensidade e duração.

### 3.3.2 Remoção de Tendência da Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO

No presente estudo, as análises se concentram em avaliar padrões da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO associados ao comportamento de valores de Tmax e Tmin observadas em RMBH, RMRJ e RMSP. Nesse ponto, vale destacar que os valores de carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO possui tendência de crescimento linear ano após ano e este comportamento está associado fatores macroeconômicos e demográficos (HIRATSUKA ESTAVARE, 2022; MATHIAS et al., 2015; MOREIRA; OHISHI, 2015). Diante disso, é necessário filtrar efeitos econômicos sobre a variável em questão, a fim de captar melhor a influência de variáveis meteorológicas, como Tmax e/ou Tmin. Sendo assim, foi adaptada a metodologia utilizada por (SANTÁGATA et al., 2017), denominado pelos

autores por “Método LS” que consiste no cálculo do filtro “ $f_i$ ”, que compara o valor médio da carga do Subsistema SE/CO para um dado ano com o valor médio da mesma variável para todo o período da série histórica de dados, conforme as equações a seguir:

$$f_i = \frac{E_i}{\underline{E}} \quad (1)$$

$$\underline{E}_j = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} E_{ij}}{n_j} \quad (2)$$

$$\underline{E} = \frac{\sum_{i=2003}^{2022} \sum_{j=1}^{n_j} E_{ij}}{\sum_{i=2003}^{2022} n_j} \quad (3)$$

onde cada ano é representado pelo índice “i”, cada dia do respectivo ano é representado pelo índice “j”,  $\underline{E}_j$  representa o valor médio anual calculado para um dado ano “i” ( $n_j = 365$  dias) e  $\underline{E}$  corresponde à média de todo o período da série histórica de dados diários da Carga do Subsistema SE/CO ( $n_j = 8090$  dias).

Em seguida, foi realizado o ajuste final para a normalização dos dados de carga do Subsistema SE/CO utilizando a seguinte relação:

$$E_{f_{ij}} = \frac{E_{ij}}{f_i} \quad (4)$$

Sendo assim, por meio da equação (4) e para cada ano em questão, o filtro “ $f_i$ ” foi aplicado para os dados diários da carga do Subsistema SE/CO, removendo a tendência linear de crescimento desta variável relacionada a efeitos macroeconômicos e respeitando a sazonalidade dos dados, visto que o filtro é um valor único para todos os dias do ano em questão.

Posteriormente, foram calculados limiares baseados nos percentis 90 e 10 para a carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO para cada dia do ano, aplicando filtro de ruídos utilizando a média móvel com janela de 15 dias, centrada no dia em questão. Os cálculos desses limiares foram elaborados para obter valores de referência e permitir a

comparação da carga normalizada do Subsistema SE/CO, sendo possível atestar valores de carga muito baixa (abaixo do limiar baseado no percentil 10) e muito alta (acima do limiar baseado no percentil 90).

Vale ressaltar que a normalização dos dados de carga do Subsistema SE/CO e o cálculo dos limiares baseados nos percentis 90 e 10 (com base no histórico disponível – 2003 a 2022), foram realizados separando os dados em um grupo de “dias úteis” e outro grupo com dados associados a “finais de semana/feriados”, devido a diferença no padrão de consumo entre esses tipos de datas que refletem sobre a carga do SE/CO. Nesse sentido, antes de aplicar a metodologia de remoção de tendência descrita anteriormente, a carga do Subsistema SE/CO apresenta o padrão de crescimento seguindo uma relação linear ao longo dos anos da série de dados (Figura 3.3, letra a). Porém, após aplicação da remoção de tendência (Figura 3.3, letra b), a Carga do SE/CO passa a ter comportamento estável ao longo dos anos; ou seja, sem seguir um crescimento linear e amortizando ao máximo os efeitos macroeconômicos que fazem com que a carga aumente ano a ano. Dessa maneira, as análises de influência da temperatura do ar sobre a carga do Subsistema SE/CO tornam-se mais robusta.

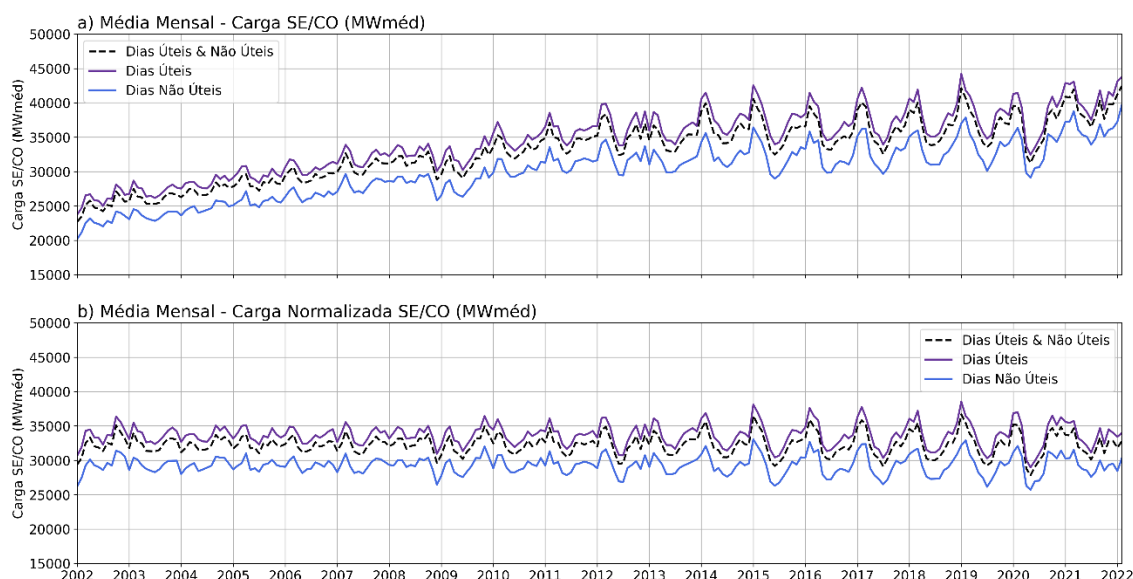


Figura 3.3: Evolução da série histórica da carga do Subsistema SE/CO antes (letra a) e após (letra b) a remoção de tendência pelo “Método LS”.

### 3.3.3 Análise das relações entre a carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO e os valores diários de Tmax e Tmin

Inicialmente, para investigar a relação da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO com as temperaturas (Tmax ou Tmin) que representam as Regiões Metropolitanas em análise entre 2003 e 2021, foi calculada a correlação de Spearman de forma independente para cada ano da série de dados, além de avaliar a significância estatística destas correlações considerando nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05). Nesse ponto, vale ressaltar que o ano de 2022 não possui a série de dados de Tmax e Tmin completos, visto que estes dados estão disponíveis até fevereiro de 2022. A Figura 3.4 exemplifica o procedimento descrito acima para a obtenção das correlações por ano entre a carga normalizada do SE/CO e as variáveis de temperatura de cada Região Metropolitana. Nesse sentido, esta abordagem é direcionada para tentar isolar os efeitos de temperatura de cada local em estudo sobre a carga normalizada do SE/CO e por anos, de forma independente, além de mapear a evolução da correlação entre as variáveis, identificando se há anos em que esta relação se demonstrou mais forte ou não.

Já para avaliar a influência dos fenômenos de OC's e OF's e seguindo metodologia similar ao que foi adotado por (SANTÁGATA et al., 2017), foram elaborados diagramas de dispersão entre Tmax/Tmin de cada Região Metropolitana e a série histórica de carga do

SE/CO após a normalização destes dados, considerando o período de maior relação entre as variáveis em questão e verificado por meio dos resultados de correlação de Spearman conforme comentado anteriormente. Nesta ocasião, foram destacados apenas eventos de OC's e OF's de intensidade severa (4 a 6 dias de duração) e extrema (acima de 6 dias de duração), de acordo com os critérios explicitados na subseção 3.3.1, por possuírem maior potencial de produzir elevação ou redução significativa dos valores de Carga do SE/CO. Complementarmente, vale ressaltar que o ano de 2020 foi analisado de forma individual, visto que é o ano com efeitos mais marcados das medidas restritivas em virtude da fase aguda da Pandemia por COVID-19 (HIRATSUKA ESTAVARE, 2022).

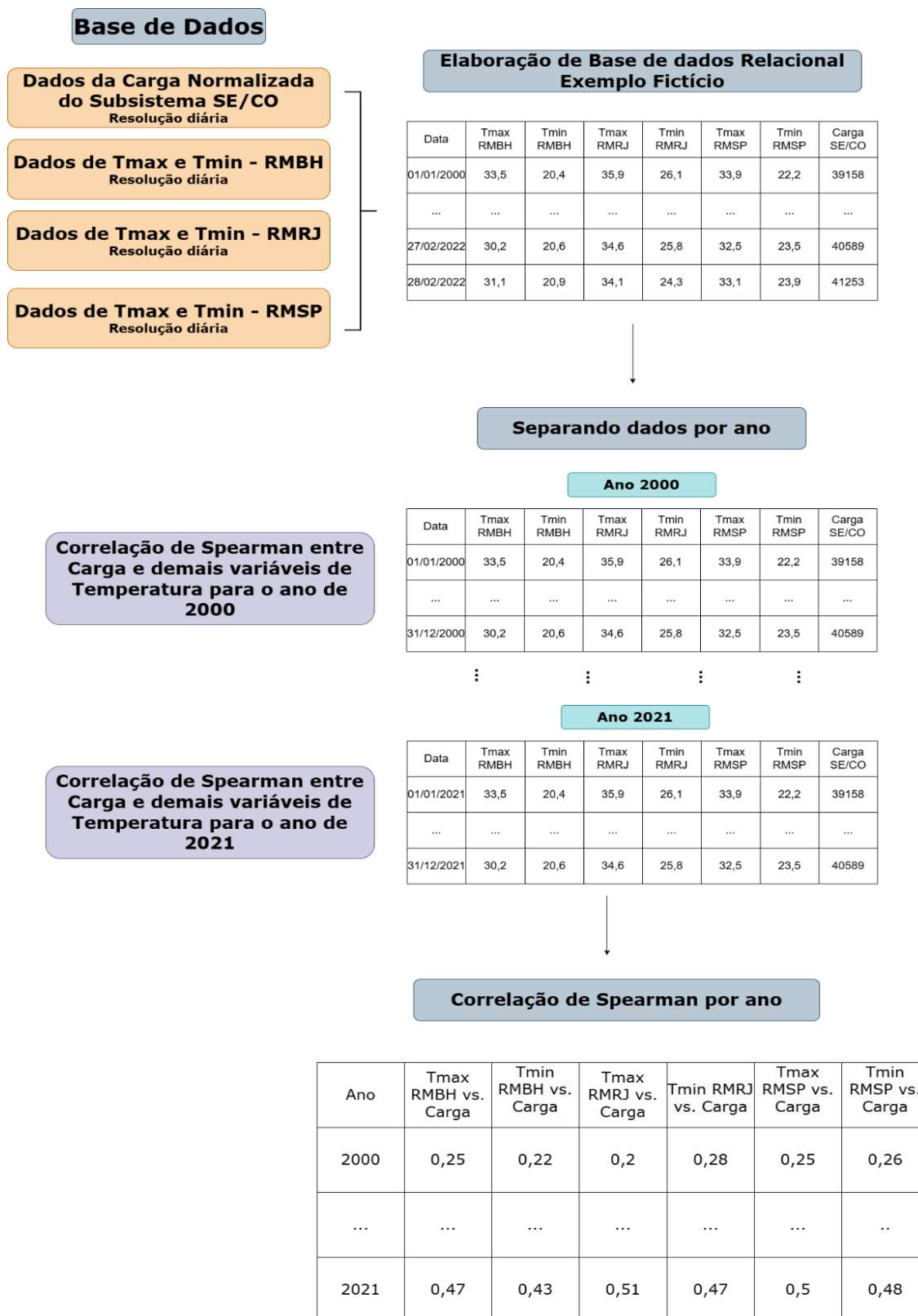


Figura 3.4: Fluxograma exemplificando processo do cálculo da correlação de Spearman para cada ano da série de dados entre a carga de energia elétrica normalizada do Subsistema SE/CO e as variáveis de temperatura de cada Região Metropolitana.

Em seguida, e adaptando a metodologia de (GEIRINHAS et al., 2019), foram elaborados gráficos da carga normalizada do SE/CO comparando com os limiares de percentis 90 e 10 para cada dia do ano. Similarmente ao que foi adotado para a normalização dos dados descritos no item anterior, os percentis foram calculados por grupos de dados de dias úteis e de finais de semana/feriados, visto que estes fatores de calendários são capazes de produzir perfis de carga diferenciados. Nesta ocasião, não foi aplicado um filtro de média móvel para suavização de ruídos sobre os limiares extremos para a carga, diferentemente do método adotado para os limiares extremos que auxiliam a definir OC's e OF's. Isso se deve ao fato do comportamento singular entre os diferentes dias da semana, no qual normalmente a carga de energia elétrica do SE/CO é maior nos primeiros dias úteis da semana. Sendo assim, a adoção destes limiares, permite identificar desvios expressivos da carga normalizada do SE/CO ao exercer valores acima (abaixo) do percentil 90 (percentil 10) em decorrência de OC's e/ou OF's entre as Regiões Metropolitanas em análise.

Posteriormente, foram mapeados casos de desvios expressivos da carga normalizada do SE/CO em função da ocorrência de OC's e/ou OF's generalizadas entre as três Regiões Metropolitanas adotadas neste estudo. Confrontou-se a carga média do período em que ocorreu o evento extremo de temperatura com a carga média do mês em que foi registrada tal ocorrência, além de comparar com o respectivo limiar extremo, sendo o percentil 90 (10) para casos de elevação (redução) da carga do SE/CO no contexto de um episódio de OC (OF). Por fim, foram elaborados gráficos de dispersão para o respectivo ano em que foram mapeados tais eventos investigados, indicando os valores de Tmax e/ou Tmin que foram registrados durante tais episódios de temperatura extrema e demarcando dias úteis e de finais de semana/feriados, por motivos explicitados previamente.

### 3.3.4 Avaliação do Impacto das Fases do ENOS sobre a ocorrência de Eventos

#### Extremos de Temperatura

Para avaliar efeitos do modo de variabilidade ENOS, os dados de Tmax e Tmin de cada Região Metropolitana, além dos dados da carga normalizada do Subsistema SE/CO, foram categorizados de acordo com a base trimestral do índice ONI, relacionando a que fase do ENOS (neutralidade, La Niña ou El Niño) estava ocorrendo para aquela data em questão, o mesmo foi feito para o histórico de OC's e OF's em cada local abordado.

Em seguida, foram elaborados Boxplots entre os valores de Tmin e Tmax (eixo das ordenadas) e as fases do ENSO (eixo das abscissas), adotando a categorização se os valores de Tmax ou Tmin estavam associados a episódios de OF's, de neutralidade (i.e., sem registro de EET's), ou de OC's, resultando em 3 boxplots para cada fase do ENOS (sendo destacados pelas cores azul, branco e vermelho, respectivamente). A Figura 3.5 exemplifica a compatibilização da base de dados descrita acima, ressaltando que esse processo foi realizado para cada Região Metropolitana adotada no presente estudo.

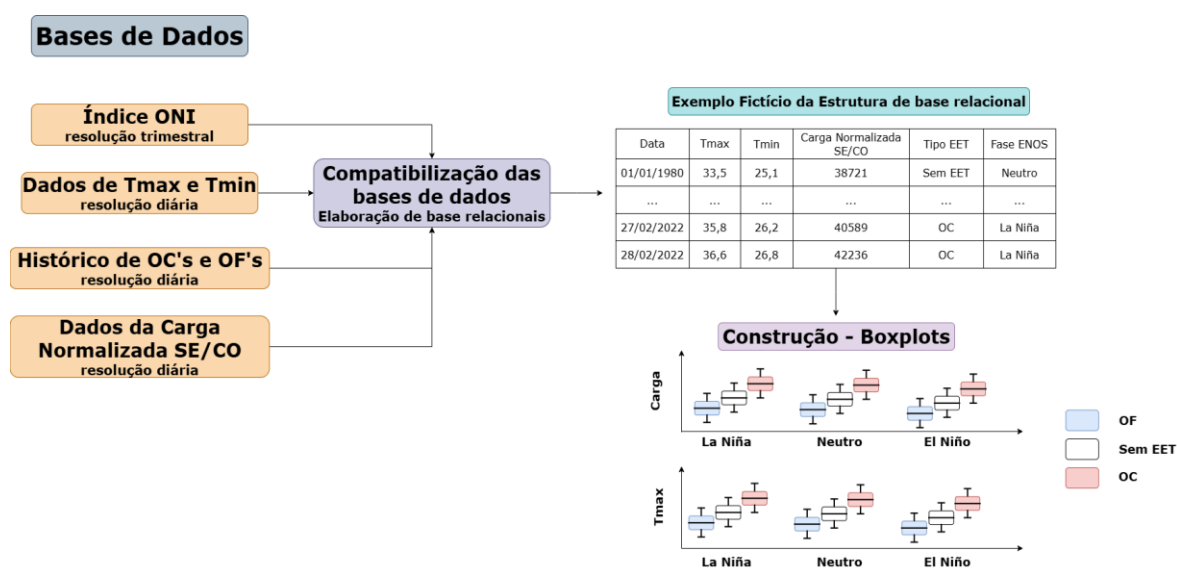


Figura 3.5: Fluxograma indicando etapas da construção da base de dados relacional entre Tmax, Tmin, carga normalizada do SE/CO e o índice ONI, usados para a construção de boxplots categorizados.

O objetivo desta análise é verificar se em períodos de La Niña (El Niño), os eventos de OF's (OC's) nas Regiões Metropolitanas exibem valores mais baixos (mais altos) de Tmax ou Tmin em comparação com eventos de OF's (OC's) em períodos de El Niño (La

Niña), buscando identificar possíveis efeitos estruturais provocados por esse modo de variabilidade de escala global.

### **3.3.5 Análise de Estudos de Casos: Comportamento da Carga em decorrência de Extremos de Temperatura e Caracterização Sinótica**

Inicialmente, com base no histórico de OC's e OF's detectadas para cada Região Metropolitana, conforme descrito na subseção 3.3.1, foi feito um levantamento de EET's que ocorressem de forma simultânea entre as regiões em questão, considerando um intervalo de até 3 dias entre o início dos eventos entre as regiões, assim como para o final dos eventos. Esse tipo de premissa foi adotado para considerar que nem sempre os eventos de OC's ou OF's iniciam ou terminam na mesma data entre as Regiões Metropolitanas.

Em seguida, com base nos eventos generalizados entre as regiões metropolitanas de OC's ou de OF's, foi conferido como a carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO se comportou diante desses EET's, se exibiu valores acima (abaixo) do limiar de percentil 90 (10) em casos de OC's (OF's), representando elevação (redução) expressiva da carga normalizada do Subsistema SE/CO. Desta forma, foi possível mapear eventos de OC's e OF's de grande impacto sobre a carga normalizada do SE/CO, selecionando casos de grande relevância para analisar de forma independente.

Adicionalmente, para os estudos de casos, foram elaborados compósitos com o objetivo de identificar os padrões sinóticos associados à ocorrência de eventos de OC's e OF's selecionados para os estudos de caso. Nessa linha, para a determinação da climatologia, foram calculadas as médias para cada mês do ano usando os dados de resolução mensal da reanálise ERA5, adotando o período de referência de 1980 a 2010. Em seguida, foi calculado o padrão médio da ocorrência do respectivo EET utilizando os dados horários da reanálise ERA5. Por fim, os padrões médios dos eventos selecionados foram comparados à climatologia calculada, gerando campos de anomalias das seguintes variáveis meteorológicas HGT500, UV500 e T850; ROC e ROL; UV850 e PREC; T2M e MSL.

Além disso, utilizando a mesma metodologia anterior da elaboração de compósitos para obtenção de padrões associados a cada evento selecionado para estudo, também foram investigados a estrutura vertical da atmosfera durante cada caso analisado, porém sob diferentes pontos de perspectiva:

1) Perfil Vertical de W e TAR, analisando as interações meridionais (variando a latitude) médias entre as longitudes de 40°O e 50°O (conforme Figura 3.6);

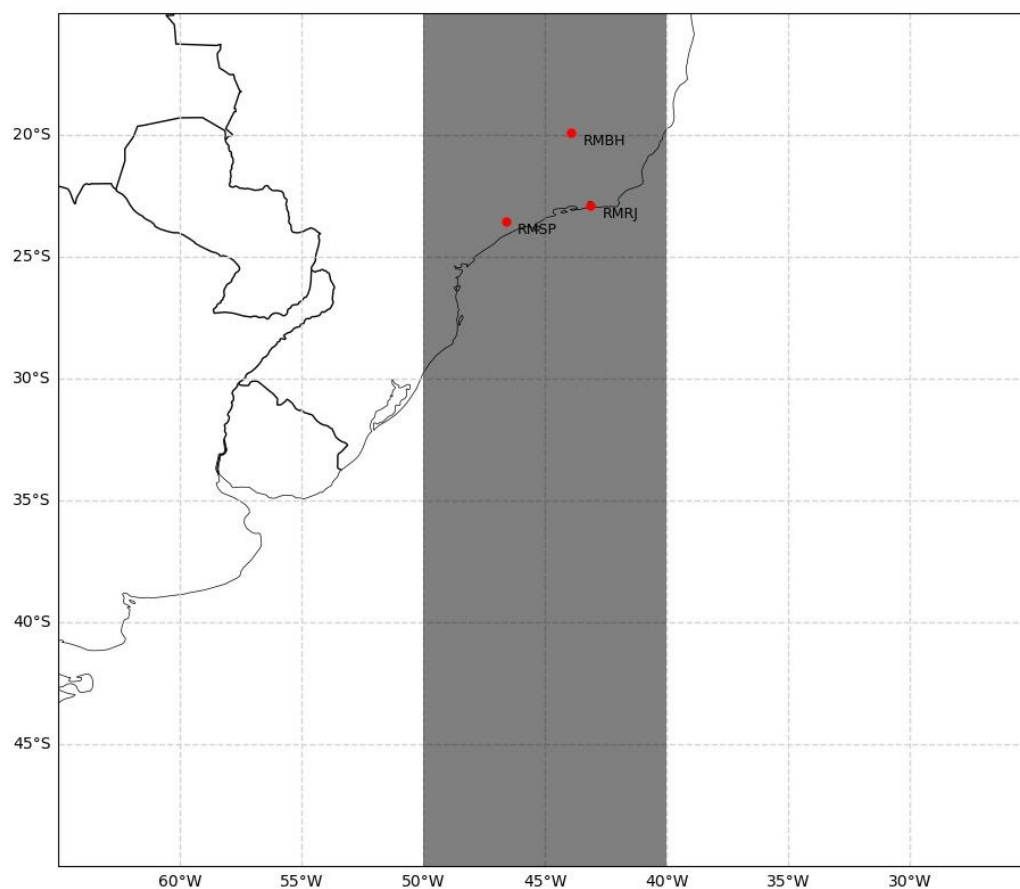


Figura 3.6: Mapa representativo demarcando intervalo de longitude 60°O e 50°O, usado para calcular o comportamento médio das variáveis de Velocidade Vertical (W) e Temperatura do Ar (TAR), variando entre a latitudes de 50°S e 15°S, demarcando a localização de RMBH, RMRJ e RMSP.

2) Perfil Vertical de W e TAR, analisando as interações zonais (variando a longitude) médias entre as latitudes de 18°S e 26°S (conforme Figura 3.7).

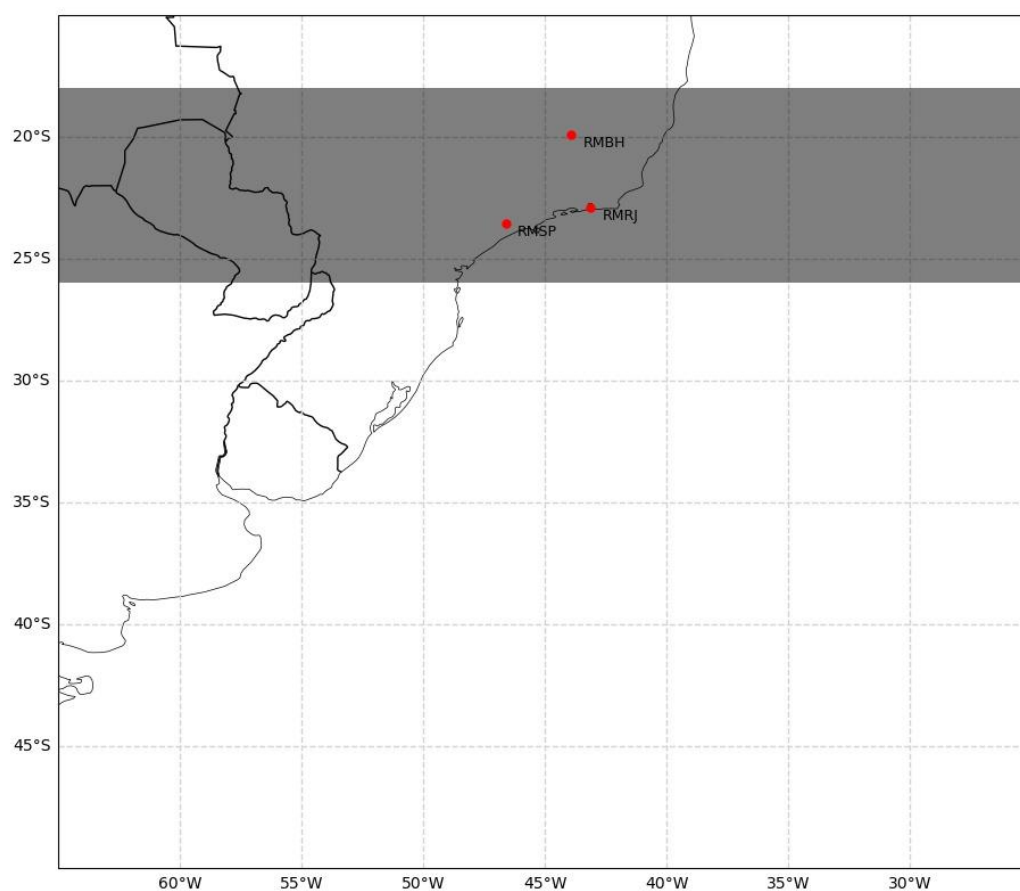


Figura 3.7: Mapa representativo demarcando intervalo de latitude 18°S e 26°S, usado para calcular o comportamento médio das variáveis de Velocidade Vertical (W) e Temperatura do Ar (TAR), variando entre a longitude de 60°O e 25°O, demarcando a localização de RMBH, RMRJ e RMSP.

Os intervalos médios de longitude (40°O e 50°O) e latitude (18°S e 26°S) para os dois casos descritos acima, foram selecionados com base na posição geográfica das Regiões Metropolitanas, de forma que essa faixa de longitude ou de latitude englobe todas as áreas de interesse e permita uma comparação em um contexto geral e não somente para pontos específicos de cada região.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Representatividade do Subsistema SE/CO**

Esta seção será dedicada a demonstrar a participação da carga do Subsistema SE/CO em relação a carga nacional (considerando todos os subsistemas elétricos) por meio dos dados disponibilizados pelo ONS. Em seguida, será indicado o percentual do consumo de energia elétrica de cada Unidade Federativa em comparação com o consumo total do Subsistema SE/CO, além de sinalizar a representação percentual das classes de consumo do subsistema e dos estados de maior expressão. Por fim, será indicado o comportamento da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO antes e após a remoção de tendência da série histórica, discretizando por dias úteis e finais de semana/feriados.

Ao considerar dados do último ano observado (neste caso, ano de 2022), a Figura 4.1 demonstra a participação de cada Subsistema Elétrico que compõem o SIN. Nesse sentido, repara-se que o Subsistema SE/CO representa cerca de 57,5% da Carga Nacional (cerca de 40.127MW médios), seguido do Subsistema S compondo 17,4% (correspondendo a 12.122MW médios), Subsistema NE com 16,2% (entorno de 11.314MW médios) e Subsistema N com apenas 8,9% (próximo de 6.217MW médios). Sendo assim, o Subsistema SE/CO representa mais da metade da carga total do SIN, reforçando sua relevância em um cenário nacional e sendo o principal balizador para reduções e/ou elevações acentuadas desta métrica.

#### Representação dos Subsistemas Elétricos no SIN - 2022

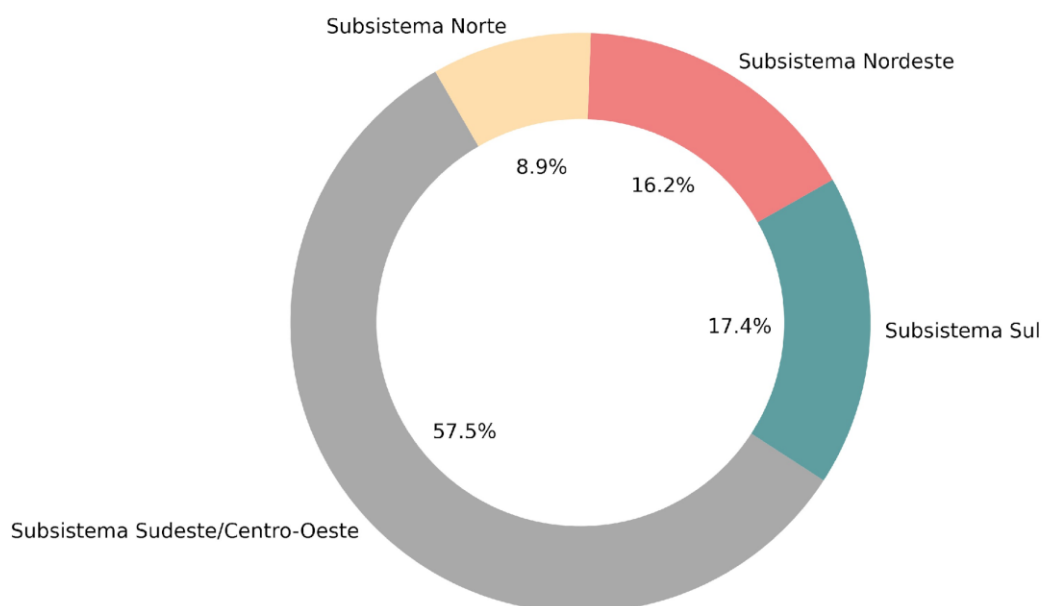


Figura 4.1: Representação percentual de cada Subsistema Elétrico em relação a carga total de energia elétrica do SIN, considerando o ano de 2022. Fonte: ONS (2023).

A Figura 4.2 indica para o ano de 2022 a representação de cada Unidade Federativa que compõem o Subsistema SE/CO, além da participação de cada classe de consumo de energia elétrica. O ano de 2022 foi escolhido para exemplificar a participação de cada estado em um contexto atual, em função de ser o último ano com histórico completo da série disponibilizada pela EPE. Dessa maneira, o estado de São Paulo representa 47,1% do consumo total do Subsistema SE/CO, seguido de Minas Gerais com 21% e Rio de Janeiro com 12,8% (Figura 4.2, letra a), sendo os que mais demandam energia elétrica neste Subsistema Elétrico. As demais unidades federativas, em conjunto, representam cerca de 19,1% do consumo do Subsistema SE/CO.

Já sobre as classes de consumo de energia (Figura 4.2, letra b), para a conjuntura geral do Subsistema SE/CO, o setor industrial possui maior relevância representando 37% do consumo de energia elétrica durante 2022, seguido do setor residencial com 29,6%, setor comercial com 19,3% e outros com 14,1% (responsável por contabilizar o consumo

relacionado a iluminação pública, setor rural, serviço e poder público, além de consumo próprio).

Tendo em vista que São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, possuem forte atuação no consumo geral de energia elétrica do Subsistema SE/CO, também é importante mapear o percentual de consumo por setor dentre esses estados em destaque. Dessa maneira, para São Paulo, o setor mais relevante é o industrial, totalizando 37,3%, em seguida vem o setor residencial com 30,7%, comercial com 20,9% e outros com 11,1%. No caso de Minas Gerais, o setor industrial possui relevância ainda mais marcada, contabilizando 54,3% do consumo total deste estado, seguido do setor residencial com 20,7%, comercial com 13,2% e outros com 11,8%. Diferente dos estados anteriores, para o Rio de Janeiro, o setor residencial é responsável pela maior porcentagem de consumo de energia elétrica com 34,5%, em sequência vem o consumo comercial com 24,5% do consumo do estado, seguido do consumo do setor industrial com 22,3% e outros com 18,7%.

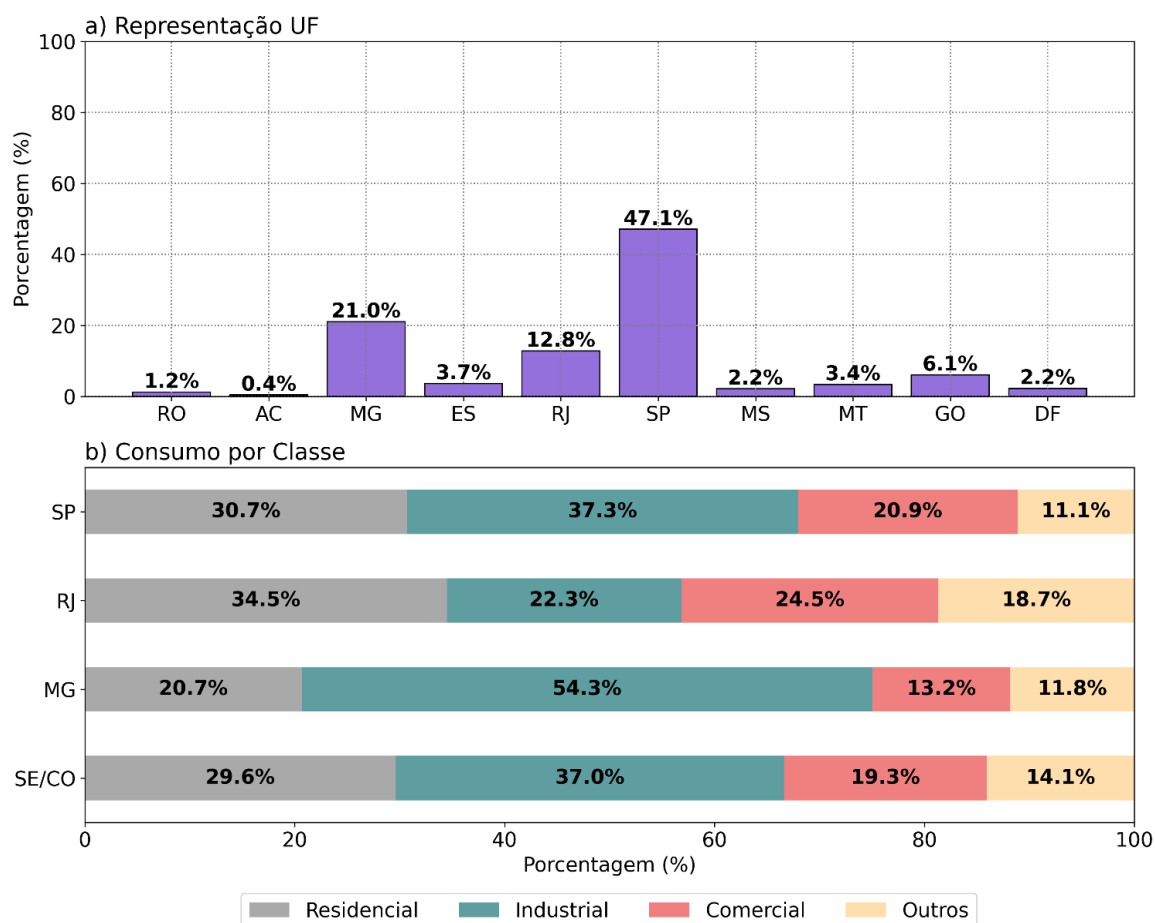


Figura 4.2: Representação percentual do consumo de energia elétrica de cada Unidade Federativa do SE/CO (letra a) e por classe de consumo, destacando a conjuntura do SE/CO e dos principais estados (letra b) Fonte: EPE (2023).

Diante disso, fica evidenciada a importância dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, dentro do contexto geral do Subsistema SE/CO, com maior representação de consumo de energia elétrica. Além disso, estes estados possuem participação expressiva do setor residencial, sendo um setor muito sensível a variações de temperatura que podem provocar aumento do consumo em virtude de períodos de calor e redução em dias mais frios (SILVA, 2013). Dessa maneira, essas Unidades Federativas possuem alto potencial para produzir elevações ou reduções na carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO.

## 4.2 Caracterização dos Eventos Extremos de Temperatura

### 4.2.1 RMBH

Para a caracterização dos EET's ocorridos no período de análise (jan/1980 a fev/2022) para RMBH, foram analisados o total de eventos por estações do ano (Verão – DJF, Outono – MAM, Inverno – JJA e Primavera – SON) para avaliar possíveis períodos do ano com mais casos de EET's. Além disso, foi elaborado uma investigação considerando o total de dias por ano com registro de OC's e OF's a fim de conferir se há padrões interanuais. Adicionalmente, foram investigados o total anual de OC's e OF's moderadas, severas e extremas, para mapear possíveis anos atípicos e observar se há maior ou menor quantidade de eventos ao longo dos anos.

Pela Figura 4.3, é possível observar o total de casos de OC's diurnas (detectadas utilizando Tmax e o limiar CTX90pct) e OC's noturnas (detectadas utilizando Tmin e o limiar CTN90pct) para a RMBH e sua distribuição por estação do ano. De modo geral, para a RMBH foram registrados 207 OC's diurnas e 166 OC's noturnas durante o período de análise. Em destaque, a estação da Primavera (SON) apresentou o maior número de EET's, contabilizando 120 casos, dos quais 66 correspondem a OC's diurnas e 54 a OC's noturnas. Em sequência, as estações do Verão (DJF) e do Inverno (JJA) registram quantidades semelhantes de eventos extremos, com 91 casos no Verão e 89 no Inverno. Nessas duas estações, a ocorrência de OC's diurnas é idêntica, totalizando 52 episódios, enquanto os eventos noturnos diferem ligeiramente, com 39 casos no Verão e 37 no Inverno. Por fim, a estação do Outono (MAM) é a que apresenta a menor atividade, totalizando 73 casos, distribuídos em 37 ocorrências de OC's diurnas e 36 episódios de OC's noturnas para a RMBH

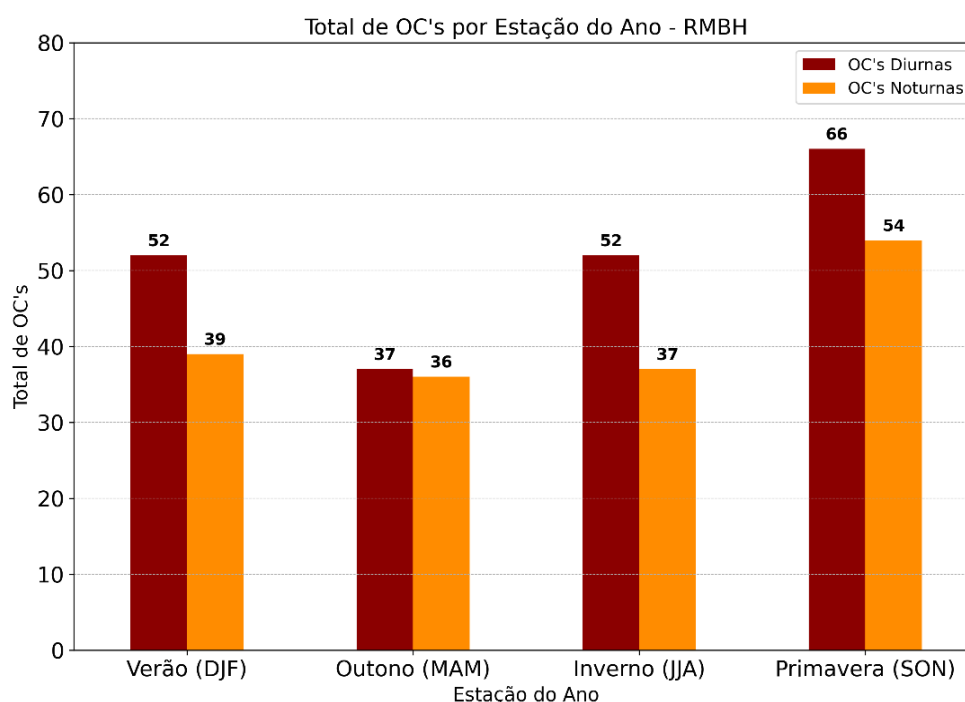


Figura 4.3: Total de OC's diurnas e noturnas (detectadas com os índices CTX90pct e CTN90pct, respectivamente) por estações do ano para RMBH durante o período de jan/1980 a fev/2022.

Pela Figura 4.4, observa-se o total anual de OC's diurnas para a RMBH, segmentado de acordo com a classificação dos eventos em moderados, severos e extremos, bem como o total de dias com ocorrência desses eventos em cada ano. De modo geral, no período de jan/1980 a fev/2022, 52% dos casos correspondem aos eventos de OC's diurnas moderadas, 38% para casos severos e 11% para os casos extremos. Analisando os anos com maior frequência de OC's diurnas moderadas, destaca-se o ano de 2003, com 6 episódios. Para os eventos severos, o ano de 1997 se sobressai, registrando 5 episódios, enquanto, para os eventos extremos, 1984 se destaca com 4 registros. Quanto ao total de dias com ocorrência de OC's diurnas, os anos de maior registro foram: 1984, com 58 dias; 1998, com 48 dias; 1997, com 46 dias; 1987, com 42 dias; 2003, com 39 dias; e 2015, com 38 dias. Em contrapartida, alguns anos apresentaram baixa ocorrência ou ausência de registros, como é o caso de 2009 e 2010, sem registros, e os anos de 2004 e 2005, com apenas 3 dias cada, além de 2013 com 5 e 2018 com 6 dias.

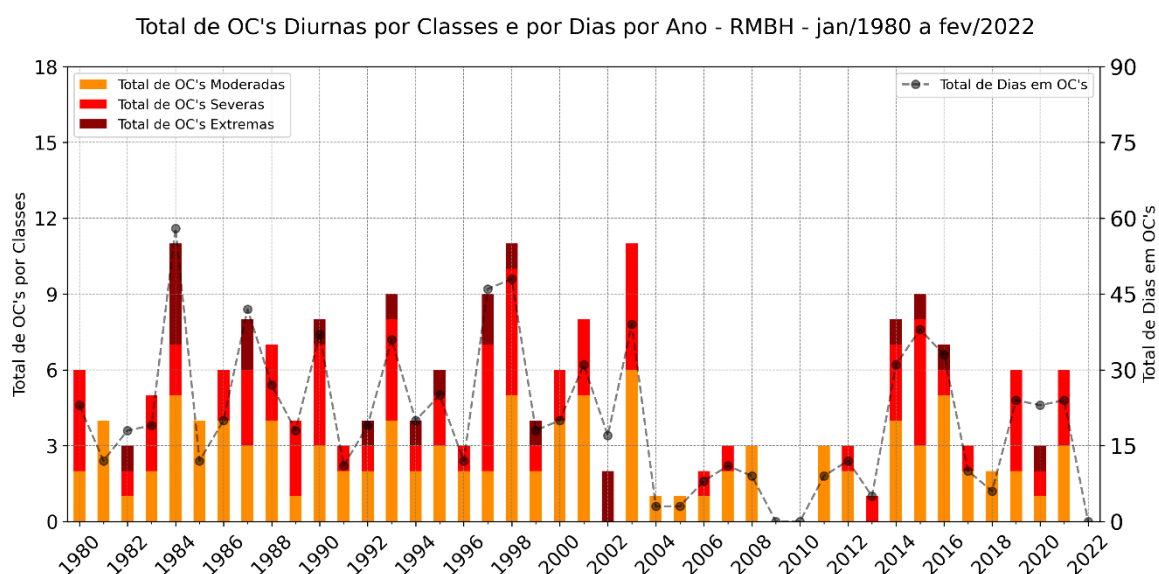


Figura 4.4: Total de OC's diurnas (detectadas com CTX90pct) registrada em RMBH, segregando pela intensidade dos eventos (moderado, severo e extremo) e o total de dias para cada ano.

A Figura 4.5 é similar a Figura 4.4, porém para casos de OC's noturnas ocorridas em RMBH. Para este tipo de Evento de Calor Extremo, 47% desses casos correspondem a OC's noturnas de intensidade moderada, 41% aos eventos severos e 12% aos eventos extremos. Ao verificar os anos com maior frequência de OC's noturnas moderadas, destacam-se os anos de 1982 e 1986, com 5 episódios cada. Para os eventos severos, o ano de 1987 se sobressai, registrando 7 episódios, enquanto, para os eventos extremos, o destaque fica para 1998, com 5 registros. Quanto ao total de dias com ocorrência de OC's noturnas, os anos de maior registro foram: 1998, com 89 dias; 1987, com 56 dias; 1982, com 40 dias; 1983, com 36 dias; e 1997, com 33 dias. Em contrapartida, alguns anos não registraram ocorrência de OC's noturnas, como 2000, 2009, 2010 e 2011, enquanto outros apresentaram baixa frequência, com apenas 3 dias, como nos anos de 1985, 1996, 2003, 2008 e 2012.

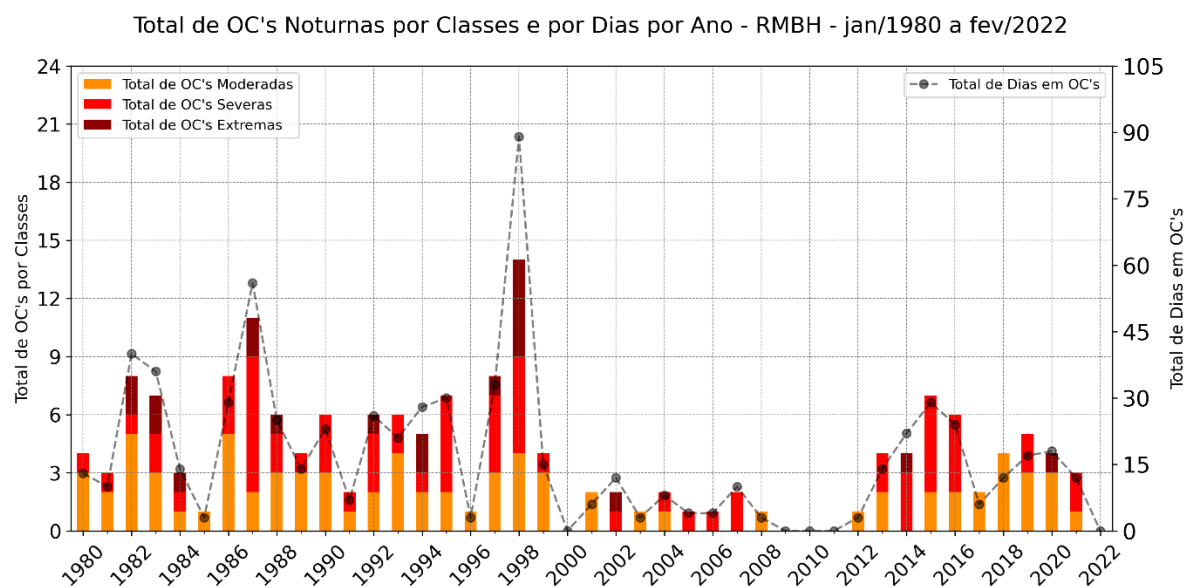


Figura 4.5: idem Figura 4.4, porém para OC's noturnas em RMBH.

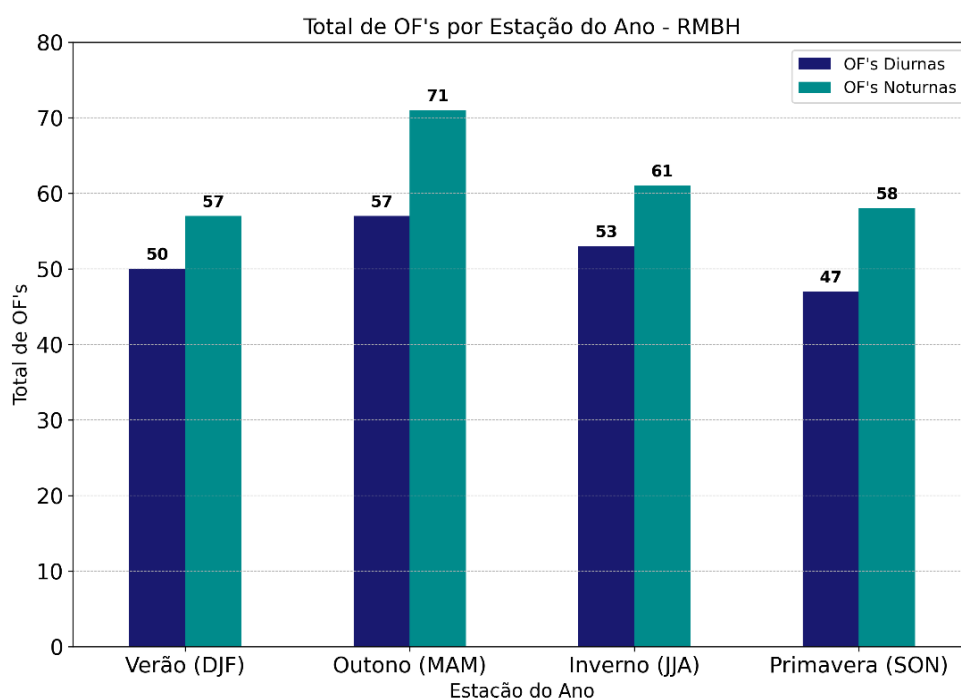


Figura 4.6: idem Figura 4.3, porém para OF's diurnas (detectadas usando o limiar CTX10pct) e noturnas (detectadas usando o limiar CTN10pct) em RMBH.

A Figura 4.6 exibe informações similares a Figura 4.3, no entanto os resultados explicitados são relacionados a OF's, no caso dos eventos diurnos (detectados usando Tmax e o limiar CTX10pct) e eventos noturnos (detectados usando Tmin e o limiar CTN10pct). Em linhas gerais, para RMBH foram registrados 207 OF's diurnas e 247 OF's noturnas durante o período de análise. Em destaque, a estação do Outono (MAM) apresentou a maior atividade de Eventos de Frio Extremo, totalizando 128 casos, dos quais 57 correspondem a eventos diurnos e 71 a eventos noturnos. Em seguida, o Inverno (JJA) registrou o segundo maior número de casos, com 114 eventos – 53 OF's diurnas e 61 OF's noturnas. Os registros para o Verão (DJF) e a Primavera (SON) foram de 107 e 105 casos, respectivamente. Nessas estações, a quantidade de OF's noturnas foi praticamente semelhante, com 57 casos no Verão e 58 na Primavera, enquanto os eventos de OF's diurnas foram contabilizados em 50 no Verão e 47 na Primavera, evidenciando uma diferença pouco expressiva entre esses períodos.

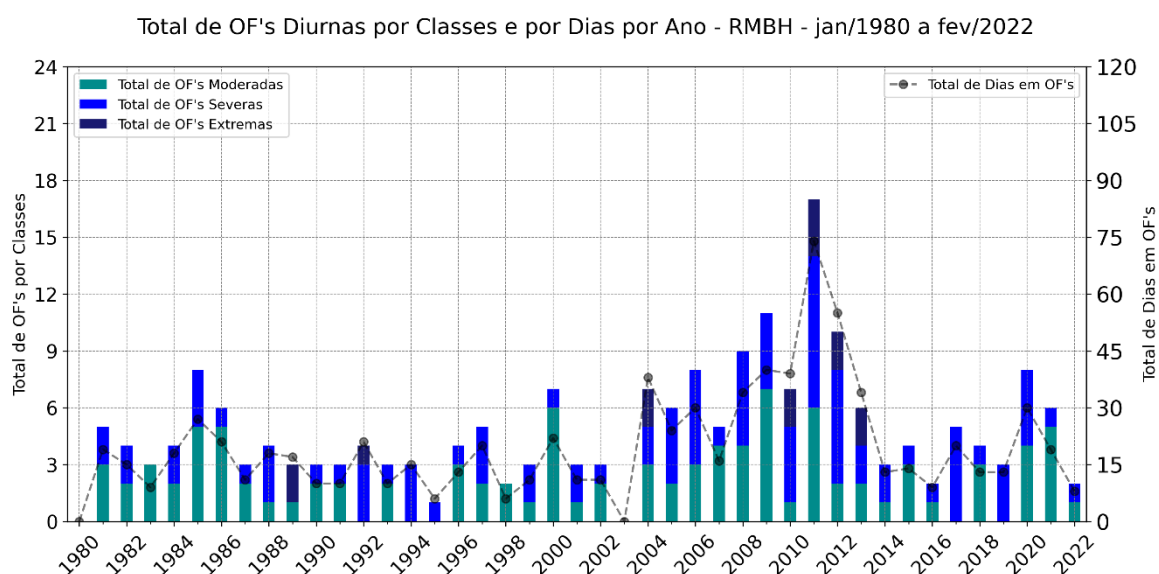


Figura 4.7: idem Figura 4.4 e Figura 4.5, porém para OF's diurnas em RMBH.

Pela Figura 4.7, observa-se o total anual de OF's diurnas para a RMBH, segmentado de acordo com a classificação dos eventos em moderados, severos e extremos, bem como o total de dias com ocorrência desses eventos em cada ano. De modo geral, no período de jan/1980 a fev/2022, 48% dos casos correspondem aos eventos de OF's diurnas moderadas, 45% aos eventos severos e 7% aos eventos extremos. Analisando os anos com maior frequência de OF's diurnas moderadas, destaca-se o ano de 2009, com 9 episódios. Para os eventos severos, o ano de 2011 se sobressai, registrando 8 episódios, enquanto, para os eventos extremos, 2011 também se destaca com 3 registros. Quanto ao total de dias com ocorrência de OF's diurnas, os anos de maior registro foram: 2011, com 74 dias; 2012, com 55 dias; 2009, com 40 dias; 2010, com 39 dias; 2004, com 38 dias; e 2008 e 2013, ambos com 34 dias. Em contrapartida, alguns anos apresentaram baixa ocorrência ou ausência de registros, como é o caso de 1980 e 2003, sem registros, e os anos de 1995 e 1998, com apenas 6 dias cada, além de 2022 com 8 dias e 1983 e 2016, com 9 dias cada.

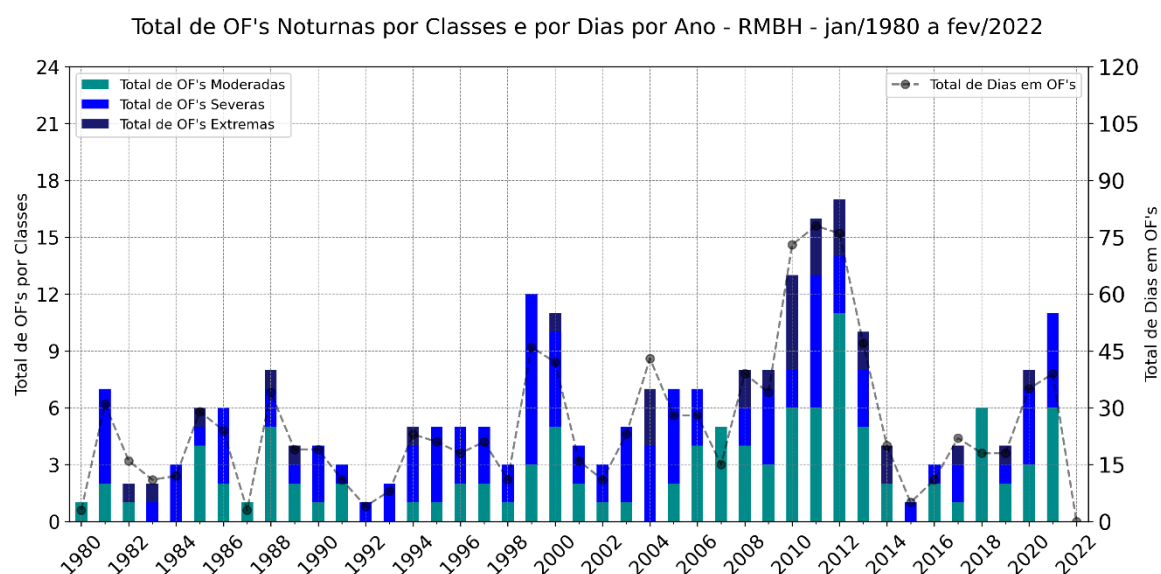


Figura 4.8: idem Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.7, porém para OF's noturnas em RMBH.

Com relação a Figura 4.8, as informações possuem formato similar à Figura 4.7, no entanto, nesta ocasião os resultados são relativos a eventos de OF's noturnas registradas para RMBH. Em linhas gerais, no período de jan/1980 a fev/2022, 44% dos eventos de OF's noturnas correspondem a intensidade moderada, 44% aos eventos severos e 13% aos eventos extremos. Analisando os anos com maior frequência de OF's noturnas moderadas, destaca-se o ano de 2012, com 11 episódios. Para os eventos severos, o ano de 1999 se sobressai, registrando 9 episódios, enquanto, para os eventos extremos, o destaque fica para 2010, com 5 registros. Quanto ao total de dias com ocorrência de OF's noturnas, os anos de maior registro foram: 2011, com 78 dias; 2012, com 76 dias; e 2010, com 73 dias. Em seguida, os anos de 2013 e 1999 também se destacam, contabilizando 47 e 46 dias, respectivamente. Em contrapartida, alguns anos apresentaram baixa ocorrência, com apenas 3 dias, como os anos de 1980 e 1987, enquanto outros se destacaram pela baixa frequência, com 4, 5 e 8 dias em 1992, 2015 e 1993, respectivamente.

#### 4.2.2 RMRJ

Nesta seção, os resultados são relativos a RMRJ (avaliação do total de OC's e OF's por estações do ano, além de investigar o total de dias e quantidade de casos moderados, severos e extremos, por ano), com a estrutura de informações e análise de resultados de forma similar ao que foi discutido e apresentado na subseção 4.2.1.

Inicialmente, pela Figura 4.9, é possível observar o total de casos de OC's diurnas (detectadas usando Tmax e o limiar CTX90pct) e OC's noturnas (detectadas usando Tmin e o limiar CTN90pct) para RMRJ e sua distribuição por estação do ano. De modo geral, para a RMRJ foram registrados 152 OC's diurnas e 166 OC's noturnas durante o período de jan/1980 a fev/2022. Em destaque, a estação do Verão apresentou o maior número de OC's diurnas, totalizando 53 casos, seguida pelo Outono, com 37 episódios, Inverno com 33 e Primavera com 29. Quanto aos eventos de OC's noturnas, a distribuição foi: 37 casos no Verão, 39 no Outono, 43 no Inverno e 47 na Primavera, evidenciando que durante a Primavera há maior ocorrência de OC's noturnas. Essa distribuição ressalta uma variação sazonal nos Eventos Extremos de Calor para a RMRJ, com o Verão dominando para eventos de OC's diurnas e a Primavera apresentando maior atividade de OC's noturnas.

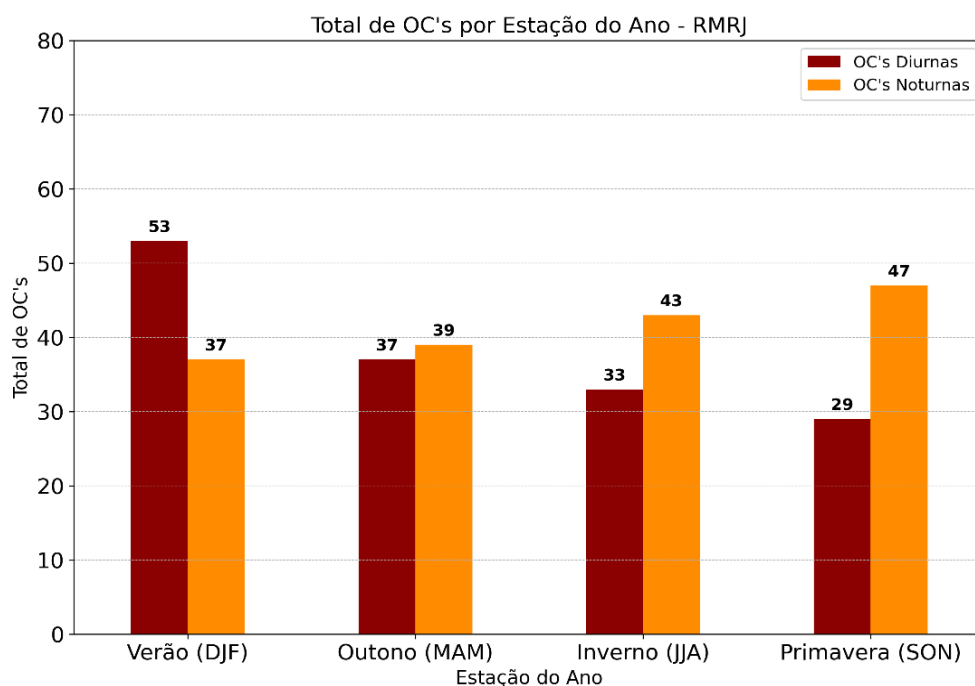


Figura 4.9: Total de OC's diurnas e noturnas (detectadas com os índices CTX90pct e CTN90pct, respectivamente) por estações do ano para RMRJ durante o período de jan/1980 a fev/2022.

A Figura 4.10 indica o total anual de OC's diurnas para a RMBH, discriminado conforme a classificação dos eventos em moderados, severos e extremos, bem como o total de dias com ocorrência desses eventos em cada ano. Em linhas gerais, durante o período em

questão, verifica-se os casos de OC's diurnas são majoritariamente moderadas, correspondendo a 68% dos eventos, sendo que 27% são atribuídos aos casos severos e apenas 5% dos casos estão relacionados a eventos extremos. Ao conferir os anos que possuem maior frequência de OC's diurnas moderadas, nota-se os anos de 1986, 1992, 2013 e 2019 com o maior registro, totalizando 5 casos para cada ano. Para os eventos severos, o ano de 2002 se destaca, com 4 episódios. Já para eventos classificados como extremos, não é muito comum a ocorrência deste tipo de evento, alguns anos registraram apenas um caso, como em 2016, 2015 e 2014. No que diz respeito, ao total de dias com ocorrência de OC's diurnas, os anos de maior registro foram: 2015, com 27 dias; 1994, com 25 dias; 2010, com 24 dias; 2019, com 23 dias; e 1993, com 22 dias. No entanto, alguns anos não registram nenhum ou possuem baixa ocorrência de evento de OC's diurnas, como é o caso de 1996, sem registros, e os anos de 1989 e 2008, com apenas 3 dias cada, e 2004 com 4 dias.

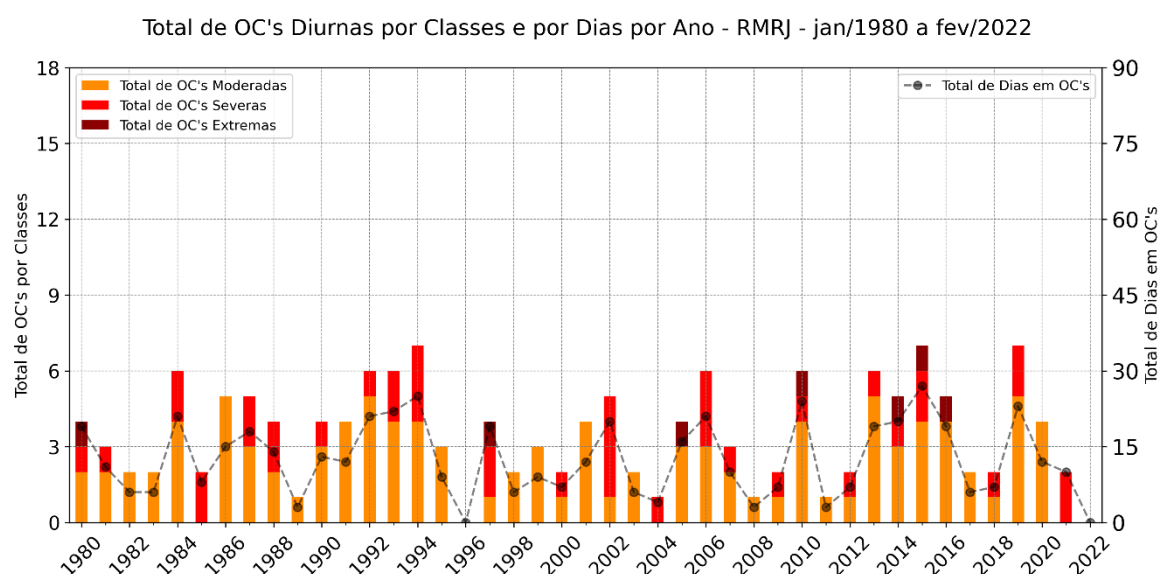


Figura 4.10: Total de OC's diurnas (detectadas com CTX90pct) registrada em RMRJ, segregando pela intensidade dos eventos (moderado, severo e extremo) e o total de dias para cada ano.

Similarmente a Figura 4.10, a Figura 4.11 expõem informações para casos de OC's noturnas ocorridas em RMRJ. De modo geral, os eventos de OC's noturnas moderados representam 46% dos casos, já 41% dos casos correspondem aos eventos severos e 13% aos eventos extremos. Tomando como base os anos com maior frequência de OC's noturnas moderadas dentro do histórico, os anos de 1994 e 1998 sobressaem com 7 episódios

registrados para cada ano. Para os eventos de OC's noturnas severos, os anos de 1986 e 2019 são destacados, contabilizando 5 casos para cada ano. Diferentemente do que foi comentado para OC's diurnas extremas anteriormente, no caso de OC's noturnas extremas registradas em RMRJ, há maior ocorrência, o que indica ser um tipo de fenômeno Extremo de Calor relativamente mais comum, destacando o ano de 1998 com o total de 4 casos. Com relação ao total de dias com ocorrência de OC's noturnas, os anos com mais registros foram: 1998, com 81 dias; 2019, com 55 dias; 2020, com 43 dias; 1997, com 37 dias; e 1996, com 34 dias. Porém, alguns anos não tiveram registro de OC's noturnas, como 2017, 2013, 2011 e 2010, sendo que outros anos apresentaram ocorrência discreta, com apenas 3 dias, como nos anos de 1985, 2007, 2016.

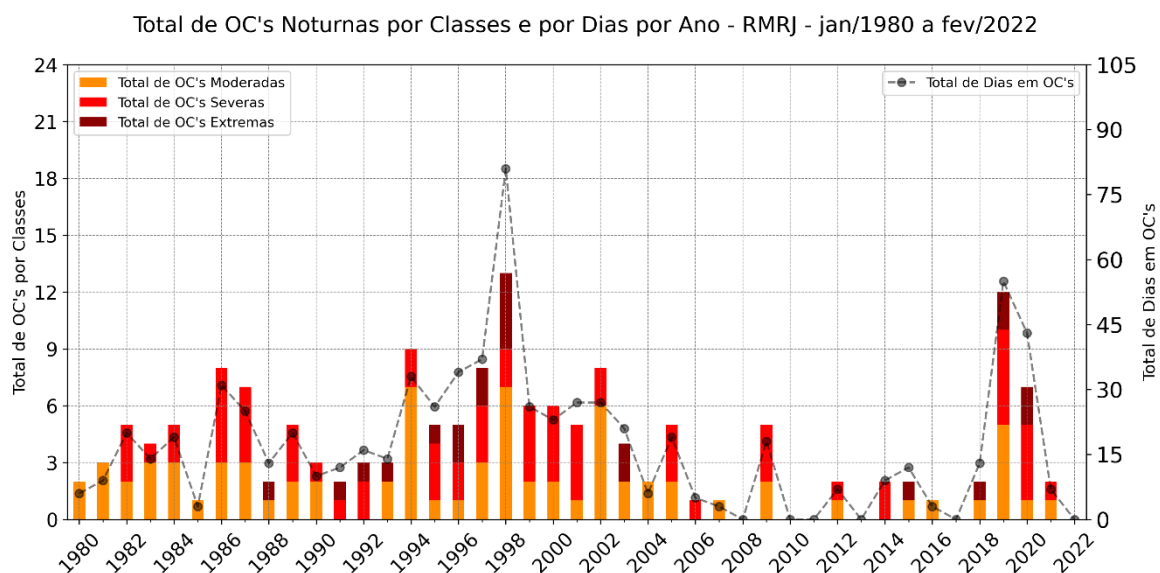


Figura 4.11: idem Figura 4.10, porém para OC's noturnas em RMRJ.

Pela Figura 4.12, é possível analisar os resultados relativos à ocorrência de OF's diurnas (detectadas usando Tmax e o limiar CTX10pct) e OF's noturnas (detectadas usando Tmin e o limiar CTN10pct) por estações do ano, similar ao abordado para a Figura 4.9. Nesse caso, foram totalizados 171 OF's diurnas e 265 OF's noturnas ao considerar o período analisado. A estação do Verão se destacou no que diz respeito a OF's diurnas, contabilizando 57 casos. Em seguida, durante o Outono foram registrados 41 episódios, para o Inverno houve 37 casos e para a Primavera foram 36 registros de OF's diurnas. Quanto aos eventos de OF's noturnas, tanto o Verão quanto a Primavera registrara o maior número de ocorrências, com 68 episódios cada, seguidos pelo Outono, com 66 casos, e pelo Inverno,

com 63 episódios, evidenciando uma pequena variação entre as estações para esses eventos; ou seja, não há sazonalidade bem estabelecida para OF's noturnas.

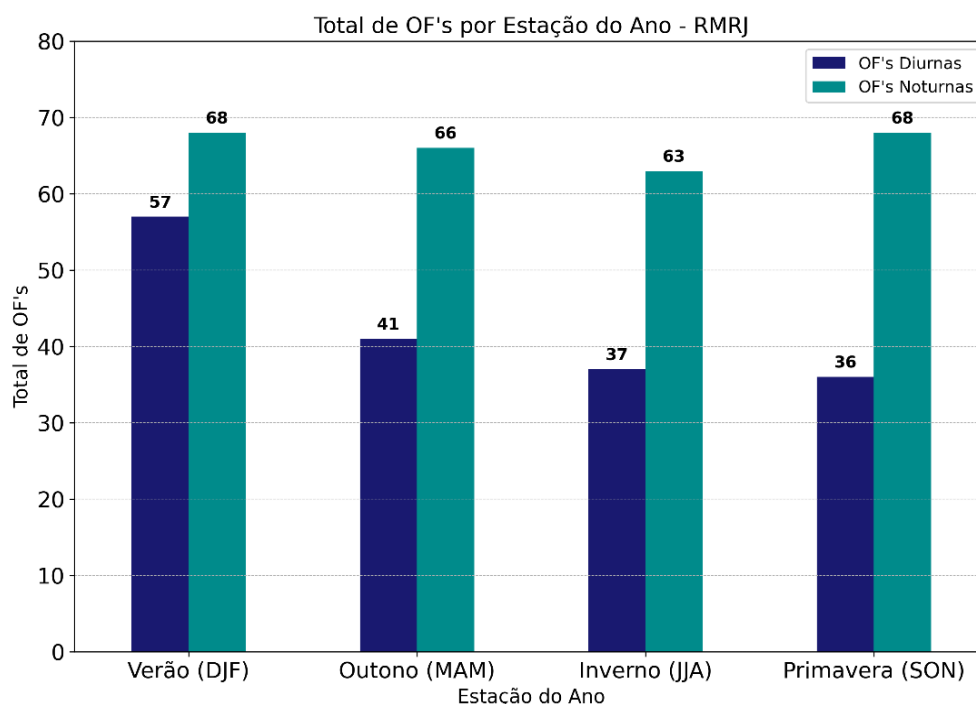


Figura 4.12: idem Figura 4.9, porém para OF's diurnas (detectadas usando o limiar CTX10pct) e noturnas (detectadas usando o limiar CTN10pct) em RMRJ.

Para OF's diurnas ocorridas em RMRJ, a Figura 4.13 indica o total de dias ocorridos por ano, além de segregar os eventos conforme suas respectivas classificações de intensidade: moderados, severos e extremos. Durante o período analisado, foi conferido que a maior parte dos eventos de OF's diurnas são moderados, representando 58% dos casos, sendo que os eventos severos conferem 38% dos casos e os eventos extremos são menos frequentes, indicando apenas 4% do total de casos de OF's diurnas. Verificando em quais períodos ocorreram mais OF's diurnas por grau de intensidade, para eventos moderados, o ano de 2013 se destaca com 6 casos. Já para eventos considerados severos, os anos de 1983 e 2008 registraram mais casos, com o total de 4 para cada ano. Ao conferir para casos extremos, a maior parte dos anos não há nenhum registro desse fenômeno e nessa intensidade, porém alguns anos contam com apenas um único episódio, como é o caso de 1994, 2008 e 2010. No que diz respeito ao número total de dias com ocorrência de OF's

diurnas, o destaque fica para 2008, que apresentou o maior registro, totalizando 37 dias. Outros anos com frequência elevada incluem 1983, com 31 dias, seguido por 2011, com 30 dias, 2020, com 28 dias, e 1991, com 26 dias. Por outro lado, alguns anos apresentaram baixa incidência ou ausência desses eventos, como 2018, no qual não houve registros. Além disso, os anos de 2015 e 2017 registraram apenas 3 dias cada, enquanto 1995 e 2003 contabilizaram 6 dias cada.

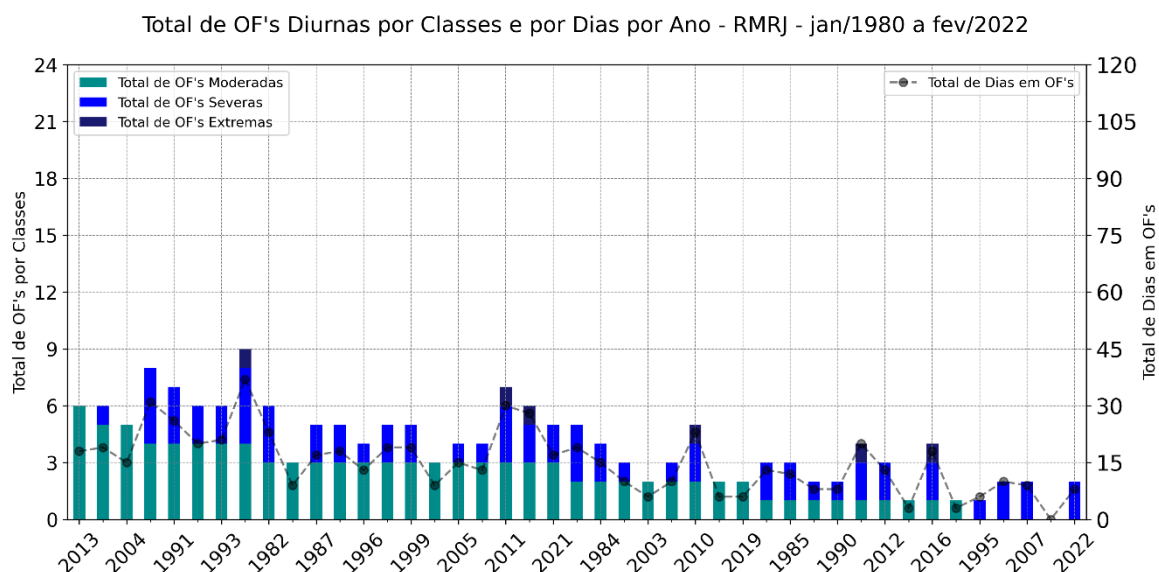


Figura 4.13: idem Figura 4.10 e Figura 4.11, porém para OF's diurnas em RMRJ.

Ao analisar os aspectos sobre severidade dos eventos de OF's noturnas para RMRJ, além do total de dias por ano em ocorrência desse fenômeno de Frio Extremo, por meio da Figura 4.14, é possível verificar um certo equilíbrio entre a ocorrência de eventos moderados e severos ao longo do período de interesse, sendo que os eventos moderados representam 47% dos casos e os eventos severos totalizam 46% dos casos. Já os eventos extremos também são menos frequentes, indicando apenas 7% dos casos. Com relação a frequência de OF's noturnas moderadas, durante o ano de 2013 foram registrados 9 casos, sendo o ano de destaque em relação ao histórico. Para os eventos severos e extremos, o ano de 2008 abriga a maior quantidade de casos, com o total de 11 eventos moderados e 5 para eventos severos. Sobre o total de dias por ano com registro de OF's noturnas, os anos com a maior quantidade de dias foram: 2008, com 106 dias; 2013, com 59 dias; 2011, com 55 dias; 1994, com 41 dias; e 2012, com 39 dias. Diferentemente do que foi conferido para OF's diurnas, nesse caso não há nenhum ano sem registro de eventos de OF's noturnas, porém há anos

com baixa ocorrência desse tipo de Evento de Frio Extremo, como: 1998, com apenas 3 dias, 2015 com 4 dias; 2001, com 6 dias; e 1984; com 7 dias. Levando em consideração as informações explicitadas anteriormente, de certa forma é possível verificar que o ano de 2008 foi atípico para RMRJ no que diz respeito a Eventos de Frio Extremo.

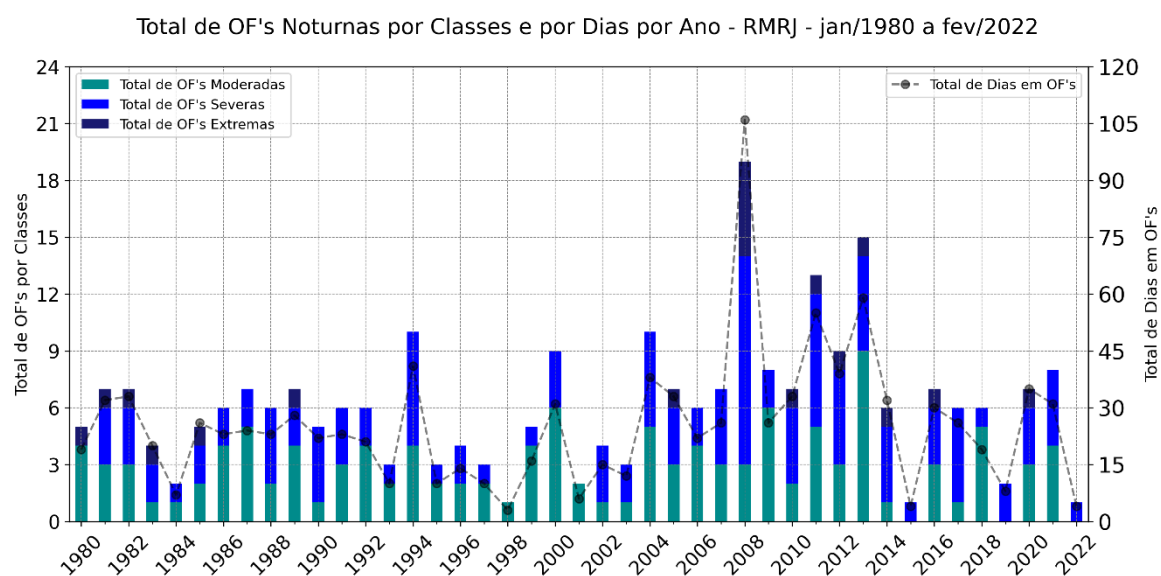


Figura 4.14: idem Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.13, porém para OF's noturnas em RMRJ.

### 4.2.3 RMSP

Esta seção apresenta os resultados para a RMSP, incluindo a análise do total de OC's e OF's por estação do ano, bem como a investigação do número total de dias e da quantidade de casos classificados como moderados, severos e extremos ao longo dos anos. A estrutura das informações e a abordagem da análise seguem um formato semelhante ao discutido nas subseções 4.2.1 e 4.2.2.

Na Figura 4.15, pode-se identificar o total de ocorrências de OC's diurnas (definidas a partir de Tmax e do limiar CTX90pct) e de OC's noturnas (baseadas em Tmin e no limiar CTN90pct) para a RMSP, assim como sua distribuição sazonal. Durante o período analisado (jan/1980 a fev/2022), foram contabilizados 200 eventos diurnos e 194 noturnos. No que diz respeito à distribuição por estações, os casos de OC's diurnas se mostraram bastante homogêneos, com 51 ocorrências no Verão, Inverno e Primavera, e uma ligeira redução para

47 casos no Outono. Em contrapartida, os eventos noturnos demonstram padrão um pouco diferente, com a Primavera apresentando o maior número (54 casos), seguida pelo Outono e Inverno, com 52 ocorrências cada, e pelo Verão, com 45 casos. Essa configuração indica uma distribuição relativamente equilibrada para os eventos diurnos, enquanto os noturnos demonstram uma leve predominância durante a Primavera e menor ocorrência no Verão, sugerindo uma variação sazonal menos acentuada, porém presente, na RMSP.

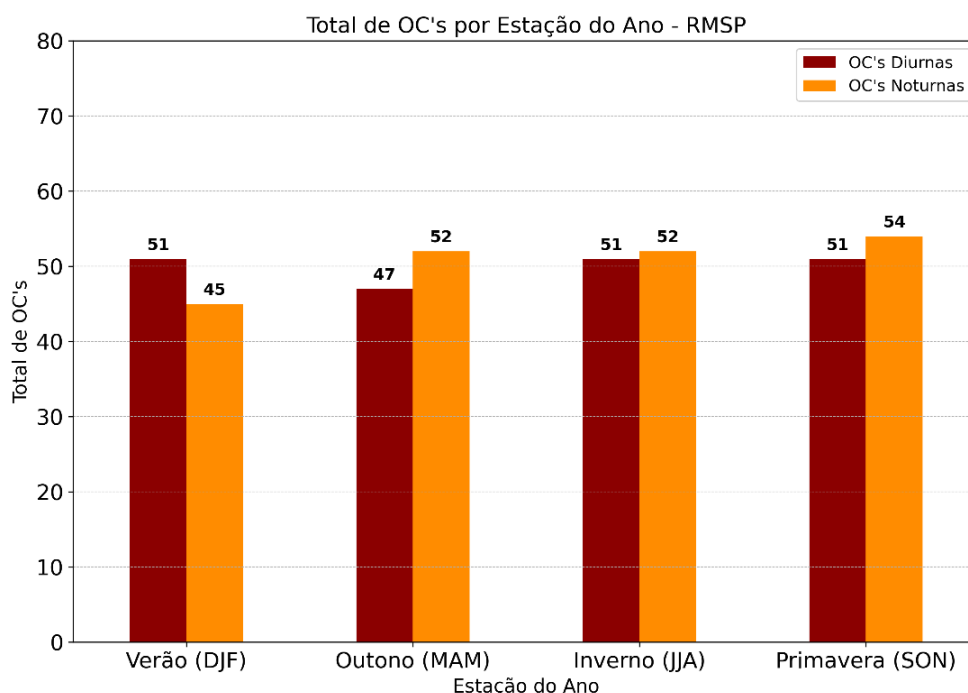


Figura 4.15: Total de OC's diurnas e noturnas (detectadas com os índices CTX90pct e CTN90pct, respectivamente) por estações do ano para RMSP durante o período de jan/1980 a fev/2022.

A Figura 4.16 apresenta o total anual de OC's diurnas na RMSP, categorizado em eventos moderados, severos e extremos, além do número total de dias com esses eventos a cada ano. De modo geral, no período analisado, observa-se que 45% dos eventos de OC's diurnas são moderados, 46% são severos e apenas 9% correspondem a eventos extremos. No que tange a maior ocorrência de OC's diurnas moderadas, nota-se que o ano com o maior registro é 2002, com o total de 7 casos. Já para eventos severos, o ano de 1994 é o de maior relevância, também registrando 7 casos. Para casos considerados extremos, os anos de 2002 e 2003 se destacam, registrando 3 casos em cada ano. Em relação ao número total de dias

com OC's diurnas, os anos com maior incidência foram: 2002, com 59 dias; 2003, com 55 dias; 1984, com 50 dias; 1994, com 44 dias; e 2001, com 41 dias. Por outro lado, alguns anos não registraram ocorrências ou tiveram baixa frequência de OC's diurnas, como 2008 e 2009, sem registros, e 1982, 1989 e 1991, com apenas 3 dias cada, além de 1981, 1983 e 2013, com 6 dias.

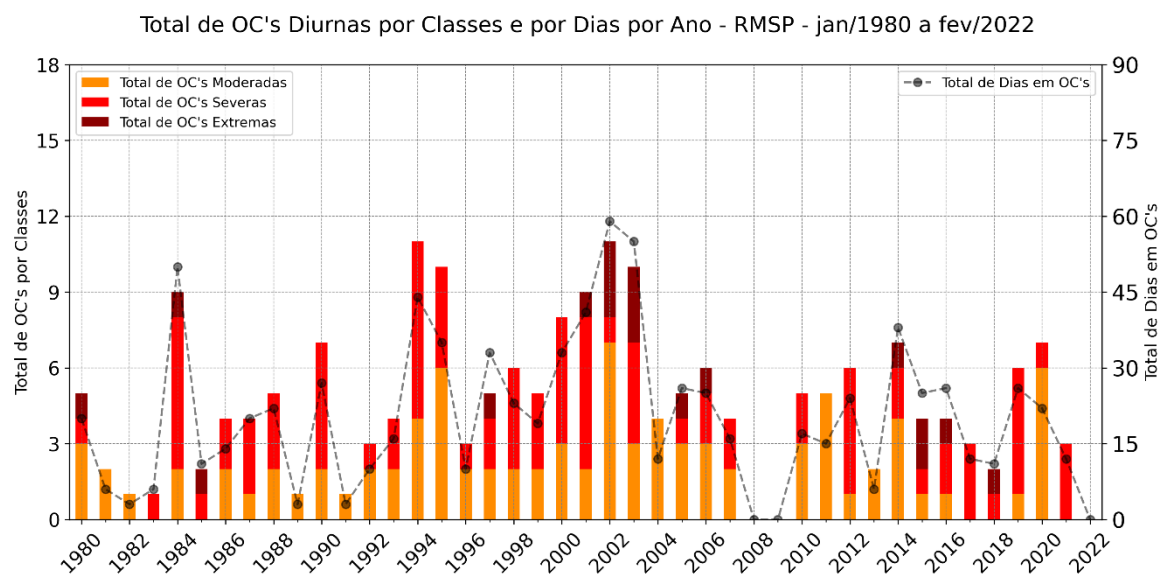


Figura 4.16: Total de OC's diurnas (detectadas com CTX90pct) registrada em RMSP, segregando pela intensidade dos eventos (moderado, severo e extremo) e o total de dias para cada ano.

Assim como a Figura 4.16, a Figura 4.17 apresenta dados sobre OC's noturnas em RMSP. Em termos gerais, os eventos moderados de OC's noturnas constituem a maioria, representando 55% dos casos, enquanto 35% são severos e 10% são extremos. Analisando os anos com maior ocorrência de OC's noturnas moderadas, 2001 se destaca com 9 episódios. Para eventos severos, 2009 é notável, com 6 casos. No que diz respeito a OC's noturnas extremas, 1998 lidera com 3 registros. Sobre o total de dias com ocorrência de OC's noturnas, os anos de maior relevância foram: 1998, com 68 dias; 2002, com 47 dias; 2009, com 45 dias; 1997, com 44 dias; e 2015, com 40 dias. Porém, alguns anos não tiveram registro de OC's noturnas, como o caso de 1988. Outros anos são marcados pela baixa ocorrência em número de dias desse fenômeno, como os anos de 1980. 1981 e 2008, contando apenas 3 dias para cada ano.

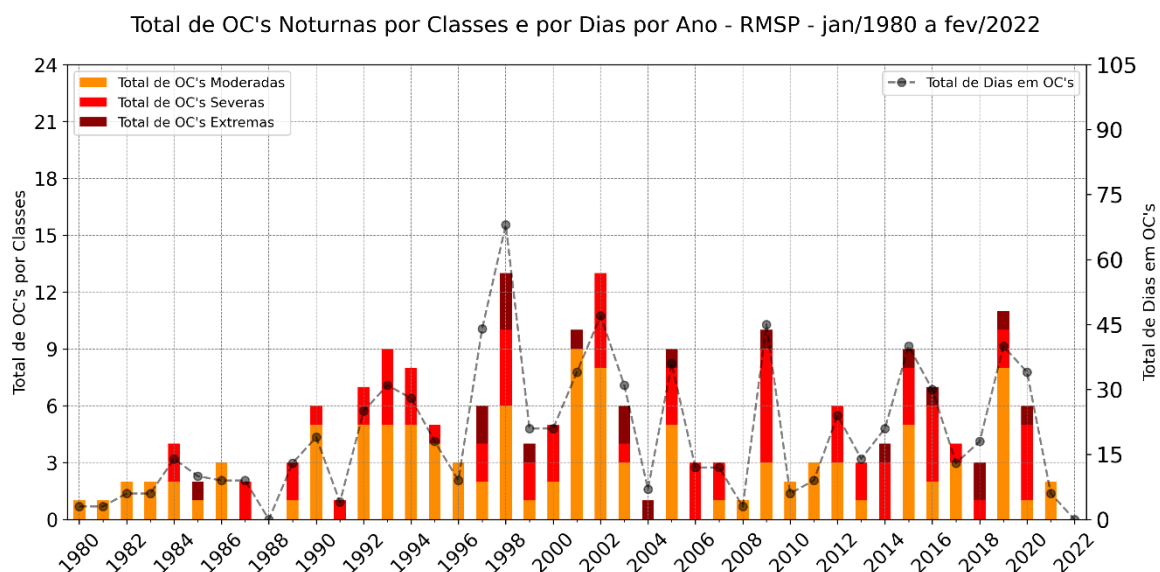


Figura 4.17: idem Figura 4.16, porém para OC's noturnas em RMSP.

Com base nas Figuras 4.16 e 4.17, observa-se que 2002 se destacou como um ano atípico para Episódios de Calor Extremo, apresentando elevada frequência de eventos diurnos de OC's e um expressivo número de dias com calor extremo, tanto em registros diurnos quanto noturnos. De maneira semelhante, 1998 evidenciou um maior número de casos extremos em eventos noturnos e um volume superior de noites com calor extremo em comparação com os demais anos. Adicionalmente, 2003 também se sobressaiu, registrando uma quantidade elevada de casos extremos de OC's diurnas, acompanhada por um expressivo total de dias com calor extremo, superando o restante do histórico. Em seguida, a Figura 4.18 evidencia o total de casos de OF's diurnas (identificadas com base em Tmax e no limiar CTX90pct) e de OF's noturnas (detectadas a partir de Tmin e do limiar CTN90pct) para a RMSP, bem como sua distribuição sazonal. Avaliando as informações, de modo geral, foram registrados 186 casos de OF's diurnas e 260 de OF's noturnas.

Destaca-se que, entre as OF's diurnas, o Verão apresentou a maior ocorrência, com 53 casos, seguido pelo Outono (47 casos), Inverno (46 casos) e Primavera (40 casos). Já para as OF's noturnas, a distribuição foi de 67 casos no Verão, 59 no Outono, 66 no Inverno e 68 na Primavera. Essa configuração ressalta uma variação sazonal nos Eventos Extremos de Frio para a RMSP, com predominância de eventos diurnos durante o Verão e maior atividade na Primavera. Já para eventos noturnos, os eventos são bem distribuídos ao longo das estações do ano, com exceção do Outono, com menor atividade desse tipo de episódio de frio extremo.

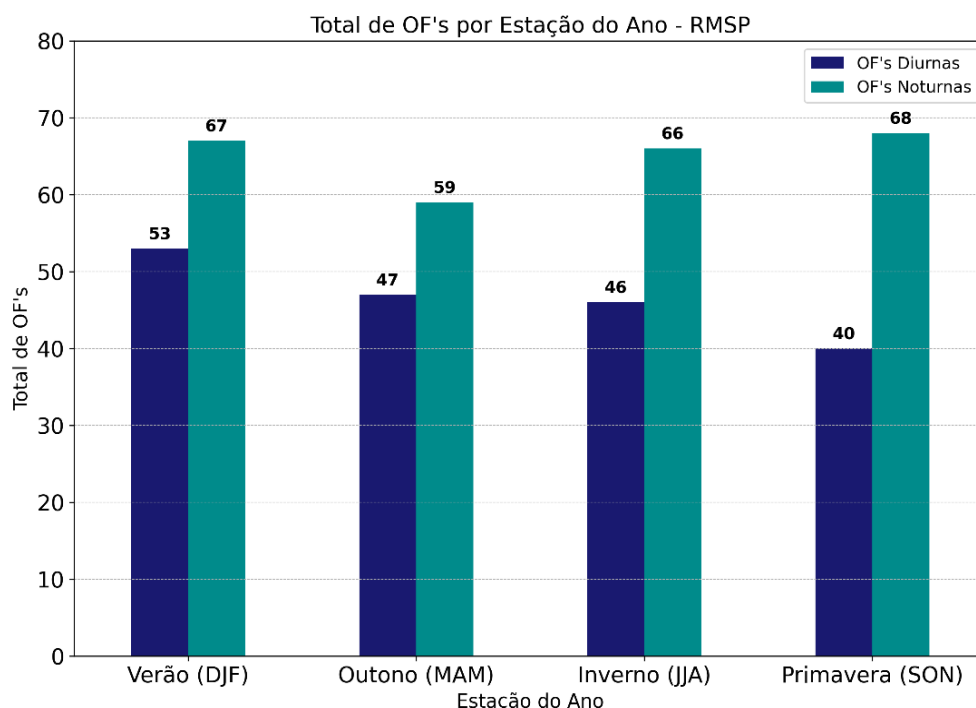


Figura 4.18: idem Figura 4.15, porém para OF's diurnas (detectadas usando o limiar CTX10pct) e noturnas (detectadas usando o limiar CTN10pct) em RMSP.

A Figura 4.19 possui estrutura similar a Figura 4.16, porém as informações explicitadas são relativas aos casos de OF's diurnas para RMSP. Nesse contexto, os eventos de OF's diurnas são majoritariamente moderados, representando 66% em relação ao total de casos desse tipo de evento. Já os casos severos, possuem menos ocorrências e indicam 31% do total de casos e os eventos extremos, são ainda menos frequentes, totalizando apenas 3% dos casos. Sobre os resultados relativos a total OF's diurnas por intensidade dos eventos, o ano de 1981 possui maior registro de casos moderado com o total de 7 eventos. A mesma quantidade de eventos (total de 7 casos) foi registrada para OF's diurnas severas durante o ano de 2008 e para eventos classificados como extremos, a maior ocorrência ocorreu no ano de 2010, com apenas 2 casos registrados. Com relação a quantidade de dias com ocorrência de OF's diurnas, o ano de 1988 se destaca contabilizando 36 dias, seguido de: 1981 e 2008, ambos com 33 dias; 2011, com 29 dias; 1983 e 2010, ambos com 25 dias; e 2004 e 2020, com o total de 23 dias para cada ano em questão. Em contrapartida, o ano de 2015 não registrou nenhum tipo de evento de OF's diurnas e outros foram marcados pela baixíssima

atividade desse tipo de Evento de Frio Extremo, como: 1999, com 6 dias; 1995, com 8 dias; e 1980, contabilizando 9 dias no total.

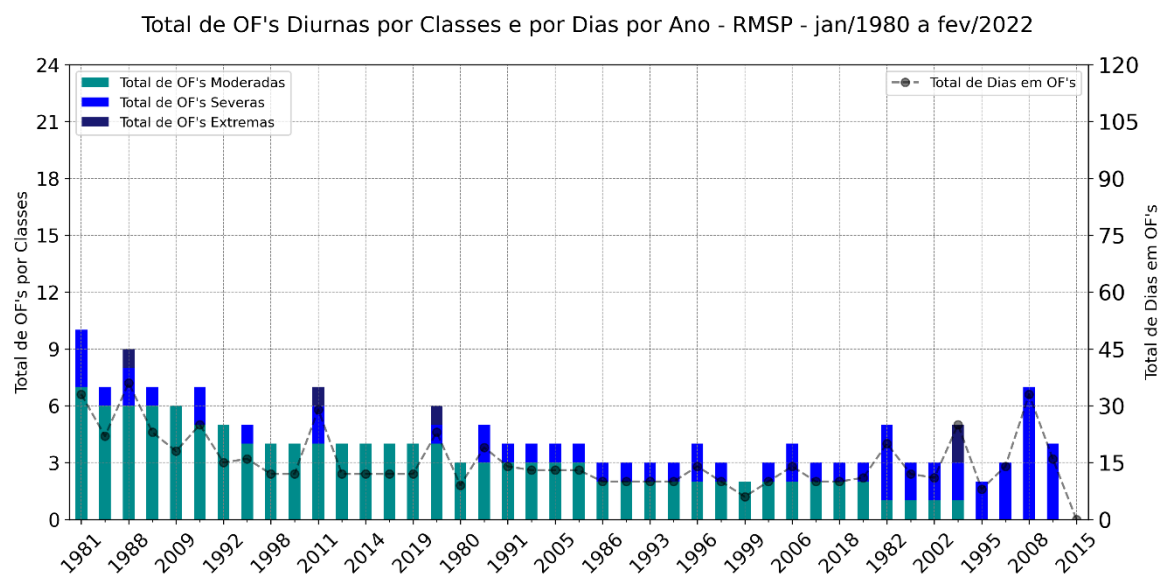


Figura 4.19: idem Figura 4.16 e Figura 4.17, porém para OF's diurnas em RMSP.

Pela Figura 4.20, é possível visualizar os resultados relativos a OF's noturnas ocorridas na RMSP, com estrutura semelhante a Figura 4.19. Em resumo, os eventos moderados e severos de OF's noturnas possuem o mesmo percentual de representação em relação ao total de casos, com cerca de 47%, já os eventos de intensidade extrema são menos representativos, com apenas 6% em relação ao total de casos. Com relação aos resultados do total de OF's noturnas levando em consideração a classificação de intensidade dos eventos, o ano de 1989 se destaca no histórico por ter a maior quantidade de casos moderados em um único ano, com o total de 9 eventos. Já para as demais classificações de intensidade de OF's noturnas, o ano de 1980 se destaca, registrando 7 eventos severos e 3 eventos extremos. Sobre o total de noites com registro de OC's noturnas em RMSP, o ano de 1980 se destaca, contabilizando 70 noites, seguido de: 1982, com 58 noites; 1981, com 55 noites; 1987, totalizando 45 noites; e 2020, registrando 44 noites. Porém, alguns anos não tiveram registro de OC's noturnas, como o caso de 1988. Outros anos são marcados pela baixa ocorrência em número de dias desse fenômeno, como os anos de 1980. 1981 e 2008, contando apenas 3 dias para cada ano.

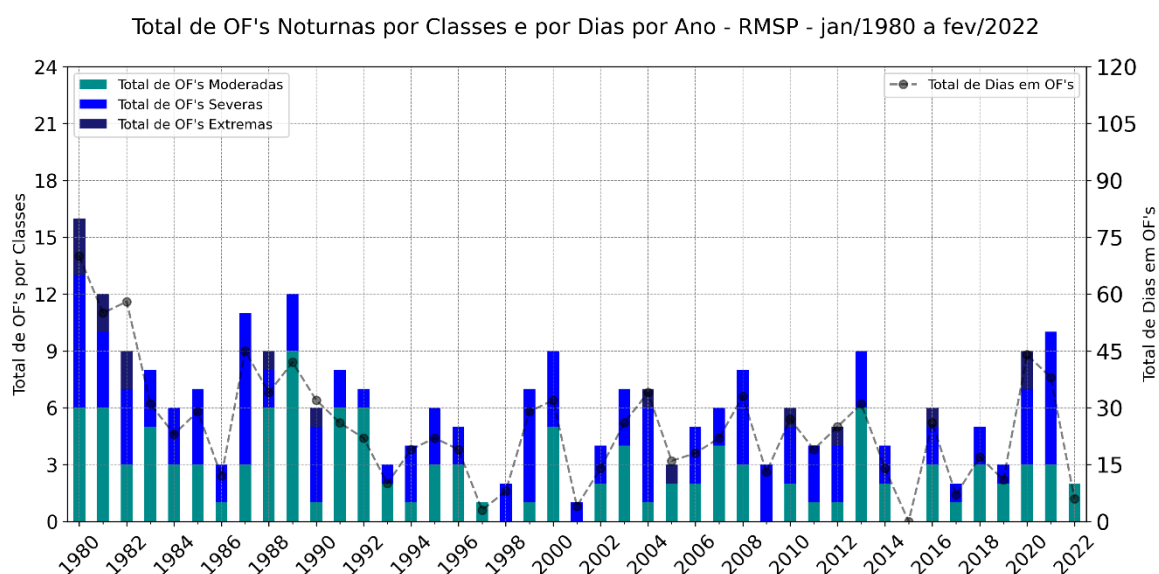


Figura 4.20: idem Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.19, porém para OF's noturnas em RMSP.

### 4.3 Relações entre os Eventos Extremos de Temperatura ocorridos entre RMBH, RMRJ e RMSP

Nesta seção, será investigado as relações entre a ocorrência de EET's (OC's e OF's), sejam casos diurnos ou noturnos, ocorridos nas Regiões Metropolitanas (RMBH, RMRJ e RMSP) de interesse do presente estudo. Essas relações serão analisadas utilizando matrizes de correlação adotando o método de Spearman, avaliando significância estatística com nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05), com o objetivo de avaliar a intensidade e a direção das associações entre o total de eventos de OC's e OF's, tanto diurnas quanto noturnas, nas três regiões metropolitanas (RMBH, RMRJ e RMSP), considerando o período de jan/1980 a fev/2022.

Através da Figura 4.21, de modo geral observam-se correlações positivas e majoritariamente moderadas entre os diferentes tipos de OC's em cada região, o que sugere que, quando há aumento no número de episódios diurnos de calor extremo, também tende a haver elevação nos episódios noturnos, e vice-versa. Além disso, é possível supor que eventos de OC's diurnas ocorram simultaneamente entre as Regiões Metropolitanas, assim como para OC's noturnas, apesar de que esse tipo de Evento de Calor Extremo exiba correlações mais fracas. Esse comportamento pode estar relacionado a condições meteorológicas mais amplas (por exemplo, sistemas de alta pressão ou bloqueios

atmosféricos) que favorecem tanto os eventos diurnos quanto noturnos, ou até mesmo Eventos de Calor Extremo simultâneos entre as Regiões Metropolitanas analisadas.

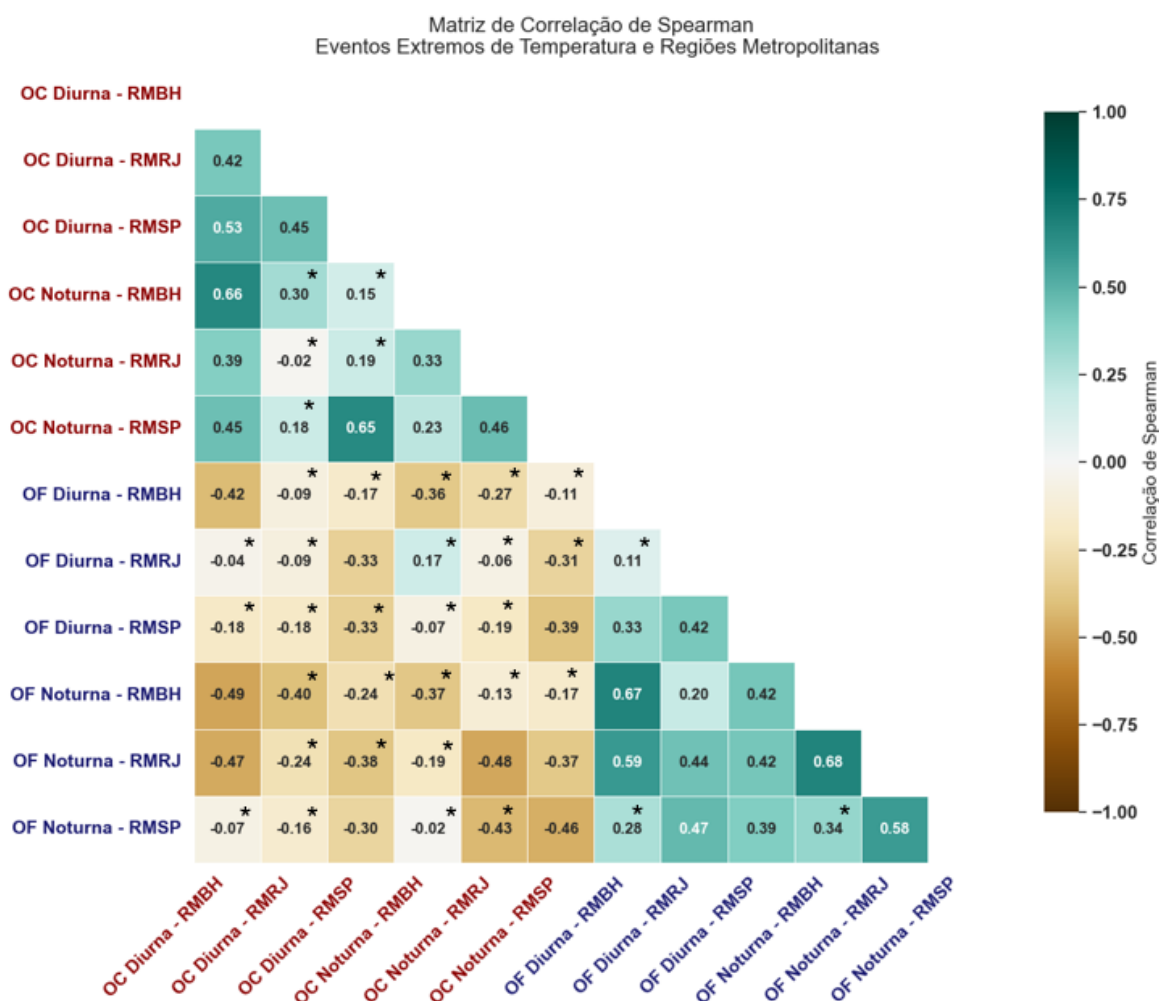


Figura 4.21: Matriz de correlação de Spearman relacionando o total de EET's diurnos e noturnos, sejam OC's ou OF's, ocorridos entre as Regiões Metropolitanas de interesse (RMBH, RMRJ, RMSP). Os asteriscos em preto destacam as correlações que não possuem significância estatística (p-value maior que 0.05), as demais correlações possuem significância estatística com nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05).

Para as OF's, as correlações entre as três regiões também se apresentam positivas, embora em valores ligeiramente inferiores na maior parte dos casos, indicando um grau de relação menor do que o observado para as OC's. Isso pode significar que, embora existam fatores climáticos de grande escala (frentes frias, incursões polares, entre outros) influenciando todas as regiões, a intensidade e a duração dos episódios frios podem variar de modo mais independente entre elas. Nesse sentido, alguns aspectos regionais podem ser

importantes para explicar essas diferenças, tais como ilhas de calor urbano, topografia, proximidade com o oceano etc. Já as correlações entre OC's e OF's, em geral, são mais fracas do que aquelas verificadas entre eventos do mesmo tipo (OC's com OC's e OF's com OF's) e negativas. Esse resultado é coerente com a ideia de que períodos de calor extremo não necessariamente ocorrem em sequência ou simultaneamente a períodos de frio extremo, e vice-versa, refletindo, possivelmente, padrões sazonais distintos e mecanismos de formação distintos para cada tipo de evento.

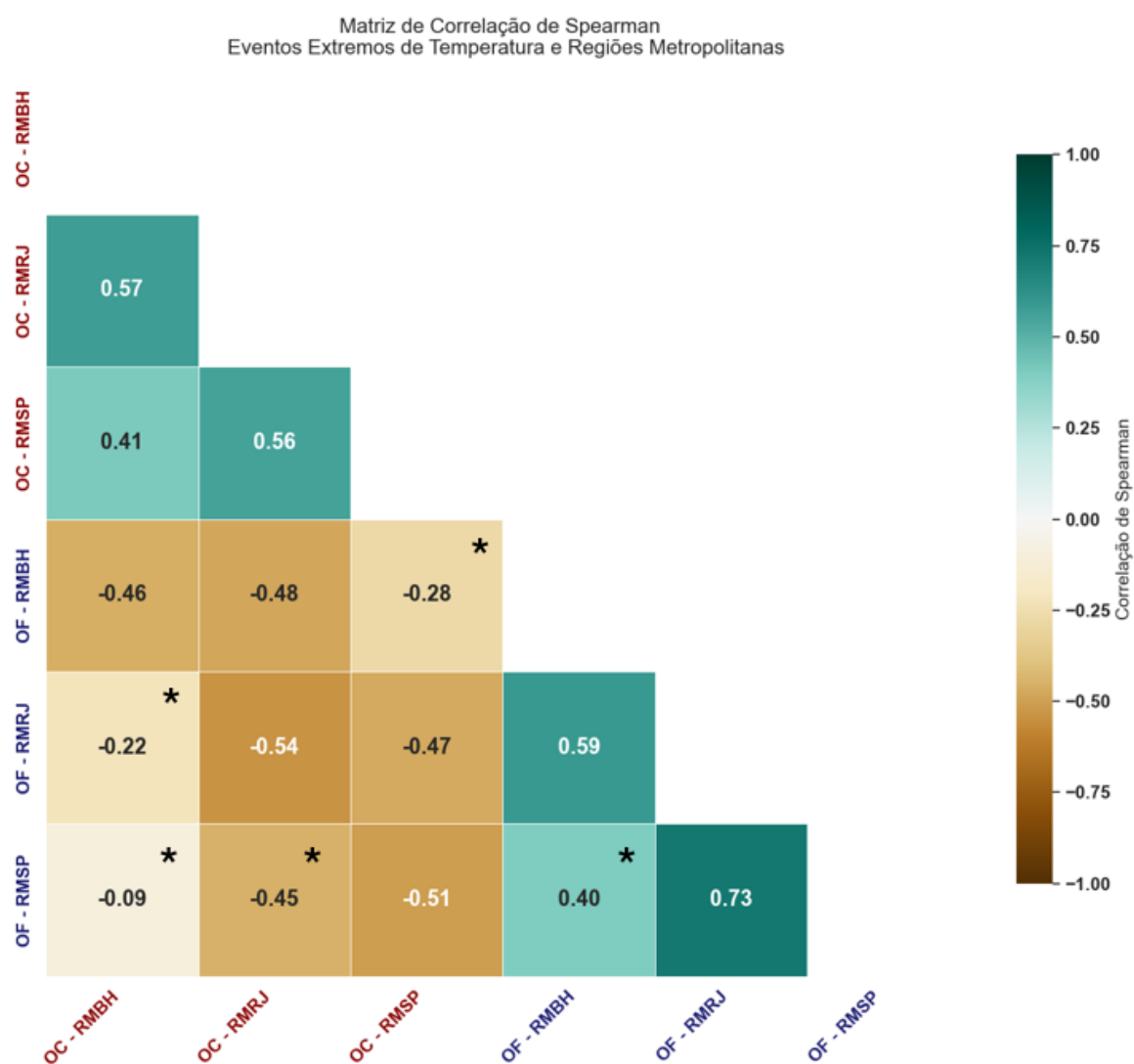


Figura 4.22: Matriz de correlação de Spearman relacionando o total de EET's, OC's ou OF's, sem categorizar por eventos diurnos e noturnos, ocorridos entre as Regiões Metropolitanas de interesse (RMBH, RMRJ, RMSP). Os asteriscos em preto destacam as correlações que

não possuem significância estatística (p-value maior que 0.05), as demais correlações possuem significância estatística com nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05).

A Figura 4.22, demonstra os resultados de correlações de Spearman por um contexto mais amplo, sem discriminar por eventos diurnos ou noturnos de OC's e OF's. Assim como verificado pela Figura 4.21, as correlações são moderadas em boa parte dos casos. Em termos gerais, há a concordância com a análise anterior de que eventos de OC's se relacionam positivamente entre as Regiões Metropolitanas, com valores de correlação variando de 0.41 a 0.57. Em destaque, é interessante notar que as OC's ocorridas em RMRJ possuem relação relativamente maior com as OC's registradas em RMSP e RMBH (valores de 0.56 e 0.57, respectivamente), no entanto a relação é mais fraca ao conferir os valores entre RMBH e RMSP (correlação de 0.41).

De forma similar, as OF's também possuem grau de correlação moderado em boa parte dos casos, variando de 0.40 a 0.73 entre as Regiões Metropolitanas. Nesse contexto, o comportamento das OF's entre as áreas de interesse segue um padrão muito similar ao que foi atestado para as OC's anteriormente, ou seja: as OF's registradas em RMRJ possuem correlação razoavelmente boa com os Eventos de frio Extremo ocorridos em RMBH (correlação de 0.59) e, sobretudo, RMSP (correlação 0.73, mais próximo de uma relação forte). No entanto, as áreas de RMSP e RMBH possuem algum grau de correlação, porém mais fraco em comparação com a situação anterior (correlação de 0.40).

Ao verificar as relações entre eventos de OC's e OF's registrados nas Regiões Metropolitanas, os valores de correlação são negativos, sendo mais fortes entre RMRJ e RMSP (variando de 0.45 a 0.54), sugerindo que não é muito provável ter ocorrência de uma OF em RMSP e uma OC em RMRJ ou vice-versa. No entanto, as relações envolvendo OC's e/ou OF's ocorridas em RMBH comparando com as demais Regiões Metropolitanas são consideravelmente mais fracos. Ou seja, aumenta as chances de que Eventos de Calor ou Frio Extremo sejam mais prováveis de acontecer somente entre RMRJ e RMSP, ao passo que RMBH acompanharia a ocorrência desses eventos em menos casos.

Essas constatações fornecem subsídios para compreender como os episódios de calor e frio extremos podem se relacionar entre si e entre diferentes regiões, servindo como base para discussões mais aprofundadas sobre padrões climáticos, mecanismos dinâmicos de geração desses eventos.

#### **4.4 Relações entre Eventos Extremos de Temperatura e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS)**

Nesta seção, serão abordadas as relações entre o ENOS e as ocorrências de OC's, OF's e sem registro desses eventos extremos (sem EET's), registradas nas Regiões Metropolitanas de interesse e as fases do ENOS. Nesse sentido, Boxplots foram elaborados para cada estação do ano com o objetivo de conferir essas relações e verificar se há algum período do ano em que se destaque mais em relação aos demais.

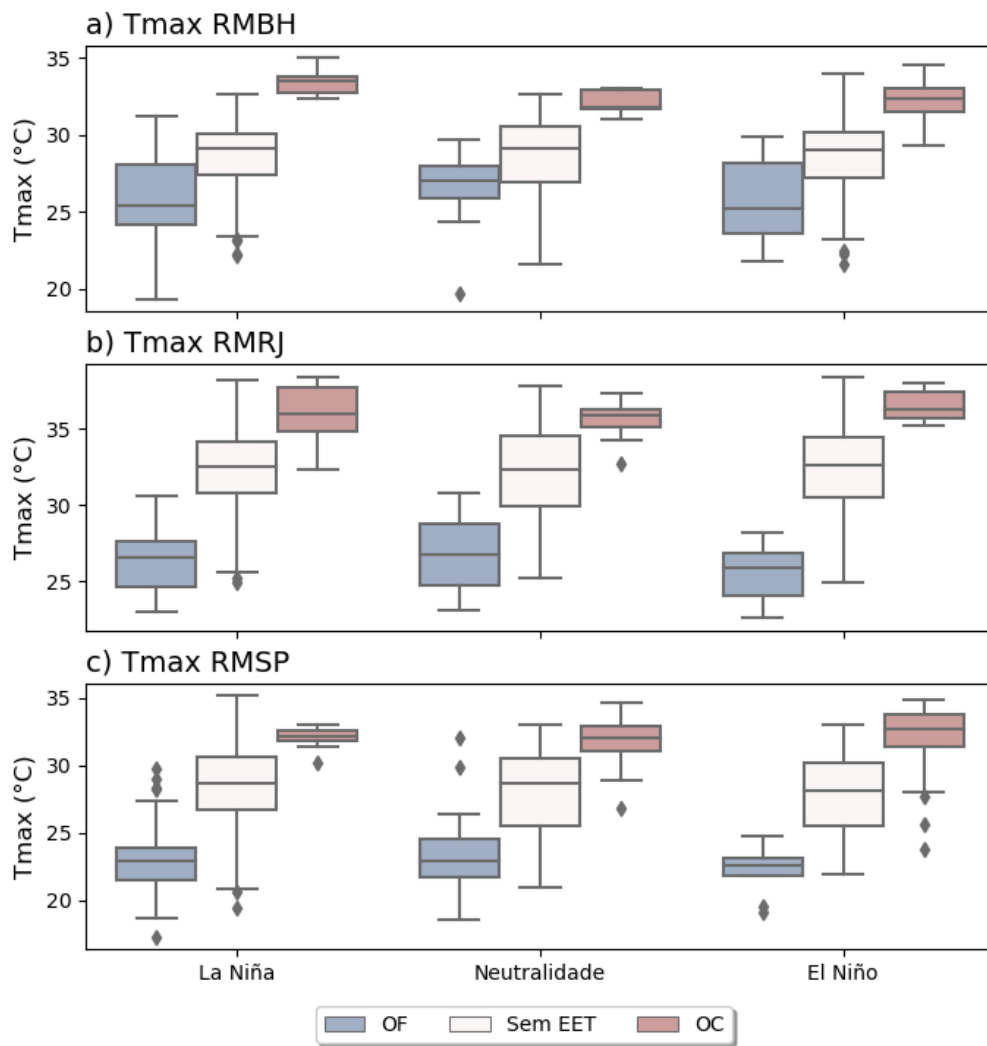


Figura 4.23: Boxplots para a temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de EET's para as diferentes fases do ENOS durante a estação do Verão (DJF).

A Figura 4.23 indica o comportamento de Tmax das Regiões Metropolitanas de interesse, categorizando essas métricas por ocorrência de OC's, OF's e sem registro de EET's e em qual fase do ENOS estavam inseridas, durante o a estação do Verão (DJF). Em linhas gerais, é possível perceber que Tmax de RMBH, RMRJ e RMSP (Figura 4.23, letras b, c e d) apresentam comportamento muito similar entre si. Sendo assim, é possível perceber que os eventos de OC's (OF's) provocam resposta muito similar de elevação (redução) de Tmax independente da fase do ENOS (La Niña, Neutro ou El Niño), sugestionando que esse modo de variabilidade por si só não pode ser considerado como um agravante para casos de

EET's. Por meio da Figura 4.24, similar a Figura 4.23, porém considera os valores de T<sub>min</sub> para as Regiões Metropolitanas analisadas, indica padrões muito similares aos observados nos comentários anteriores, sem nenhuma distinção de maior relevância. Ou seja, por meio desses resultados, é possível verificar que oscilações de alta frequência, como o ENOS, talvez não seja possível isolar seus efeitos a ponto de terem uma relação mais direta sobre eventos de menor frequência e menor escala como as OC's e OF's.

Em suma, o fenômeno ENOS pode surgir como um dos fatores para exacerbar momentaneamente certos padrões, mas somente esse modo de variabilidade não assegura que os eventos de OC's (OF's) sejam mais extremos e que impactem com maior clareza nas variáveis de T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub>. Além disso, não há variações relevantes nas demais estações do ano em relação aos comentários anteriores (Figuras disponíveis no ANEXO I).

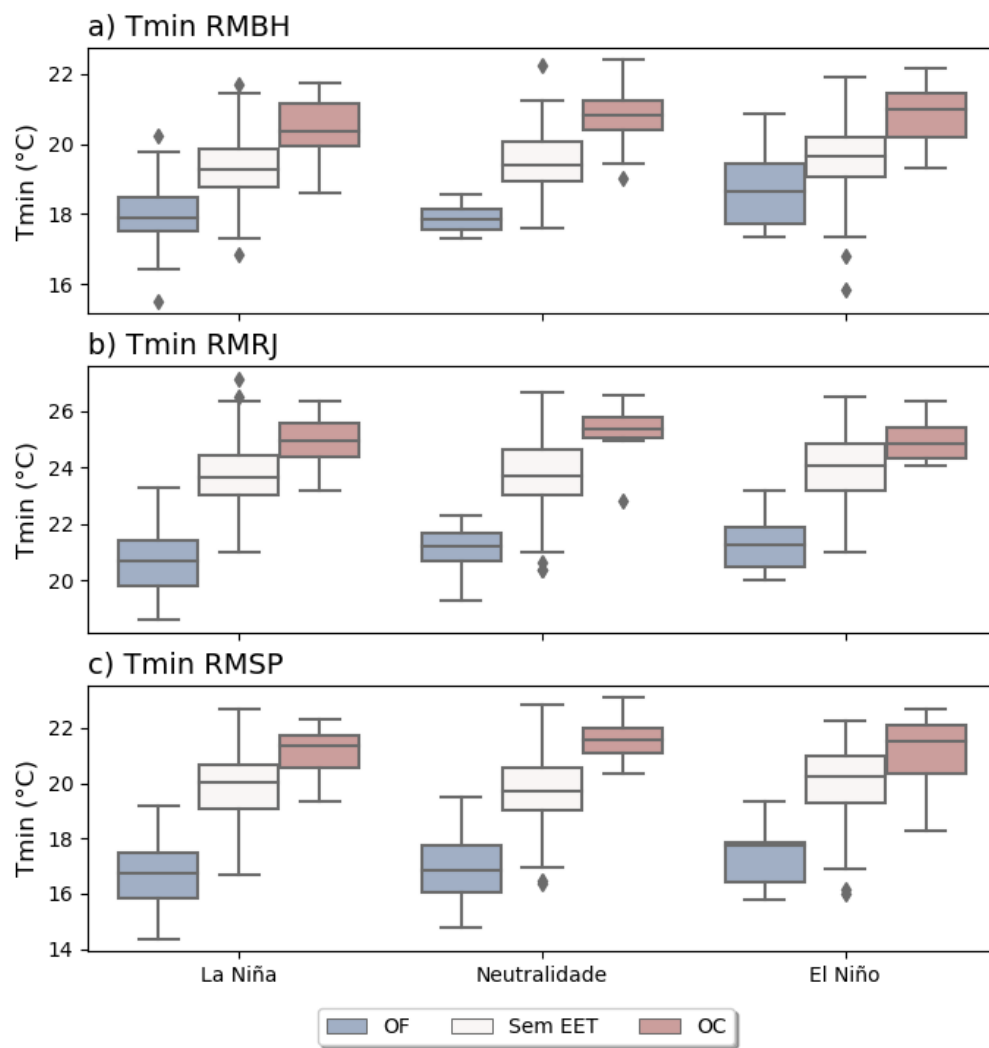


Figura 4.24: idem Figura 4.23, porém considera os valores de Tmin das Regiões Metropolitanas analisadas no presente estudo.

#### **4.5 Relações entre a Carga Normalizada de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO e os valores de Tmax e Tmin de RMBH, RMRJ e RMSP**

Nesta seção, será investigado as relações entre a carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO em função dos valores de Tmax e Tmin de RMBH, RMRJ e RMSP, por meio de correlações entre as variáveis, além da construção de gráficos de dispersão com objetivo de mapear se há períodos do ano em que estas relações se tornam mais expressivas.

Para verificar a evolução da relação entre os valores de temperatura e a carga normalizada do Subsistema SE/CO, os dados foram separados anualmente no período de 2003 a 2021 e foi calculada a correlação de Spearman, avaliando a significância estatística, com nível de confiança de 95% (valores de p-value menores que 0.05). Adicionalmente, vale ressaltar que o ano de 2022 não foi incluído na investigação de correlações devido a disponibilidade de dados de Tmax/Tmin até fevereiro deste ano; ou seja, não há o ano completo para calcular a correlação corretamente e inviabilizando a comparação com os anos anteriores. Sendo assim, a Figura 4.25 expõem os resultados da evolução temporal destas correlações calculadas com Tmax (Figura 4.25, letra a) e Tmin (Figura 4.25, letra b). Em termos gerais, tanto para os resultados obtidos com Tmax, quanto para Tmin, nota-se que as Regiões Metropolitanas em análise possuem comportamento similar ao analisar seus valores de correlação de Spearman (valor de r) ao longo dos anos. Nesse sentido, é possível observar que há comportamento distinto entre dois períodos diferentes: 1) 2003 a 2010; e 2) 2011 a 2021.

Ao avaliar os resultados de correlação de Tmax e a carga normalizada do Subsistema SE/CO (Figura 4.25, letra a), inicialmente destaca-se que para todos os anos, seja com tmax e tmin, independente da região metropolitana, os resultados possuem significância estatística com nível de confiança de 95% (p-value menor que 0.05), a exceção fica para RMBH e RMRJ durante o ano de 2008 onde a variável tmin não foi verificado significância estatística (valores de p-value maior que 0.05), coincidindo com o período da crise global do Petróleo e Gás (JOBÁGY; BAI, 2012), assim como a adoção de políticas de expansão de geração de energia elétrica por fontes renováveis em âmbito nacional (AQUILA *et al.*, 2017). Em linhas gerais, no caso de tmax para o primeiro período (2003 a 2010) a correlação é fraca, com valores médios de r de 0,34 para RMBH e 0,29 para RMRJ e 0,3 para RMSP. Já no segundo período (2011 a 2021), os valores médios de r envolvendo Tmax aumentam

significativamente, passando para 0,46 para RMBH e RMRJ e 0,43 para RMSP. Já para o caso de Tmin (Figura 4.25, letra b), no primeiro período (2003 a 2010) os valores médios de r são baixos, sugerindo correlações fracas, de 0,28 para RMBH e 0,32 para RMRJ e RMSP. Porém, assim como observado para as relações envolvendo Tmax, os valores médios de r considerando Tmin, passam a indicar correlações mais moderadas no segundo período (2011 a 2021), com 0,48 para RMBH, 0,55 para RMRJ e RMSP.

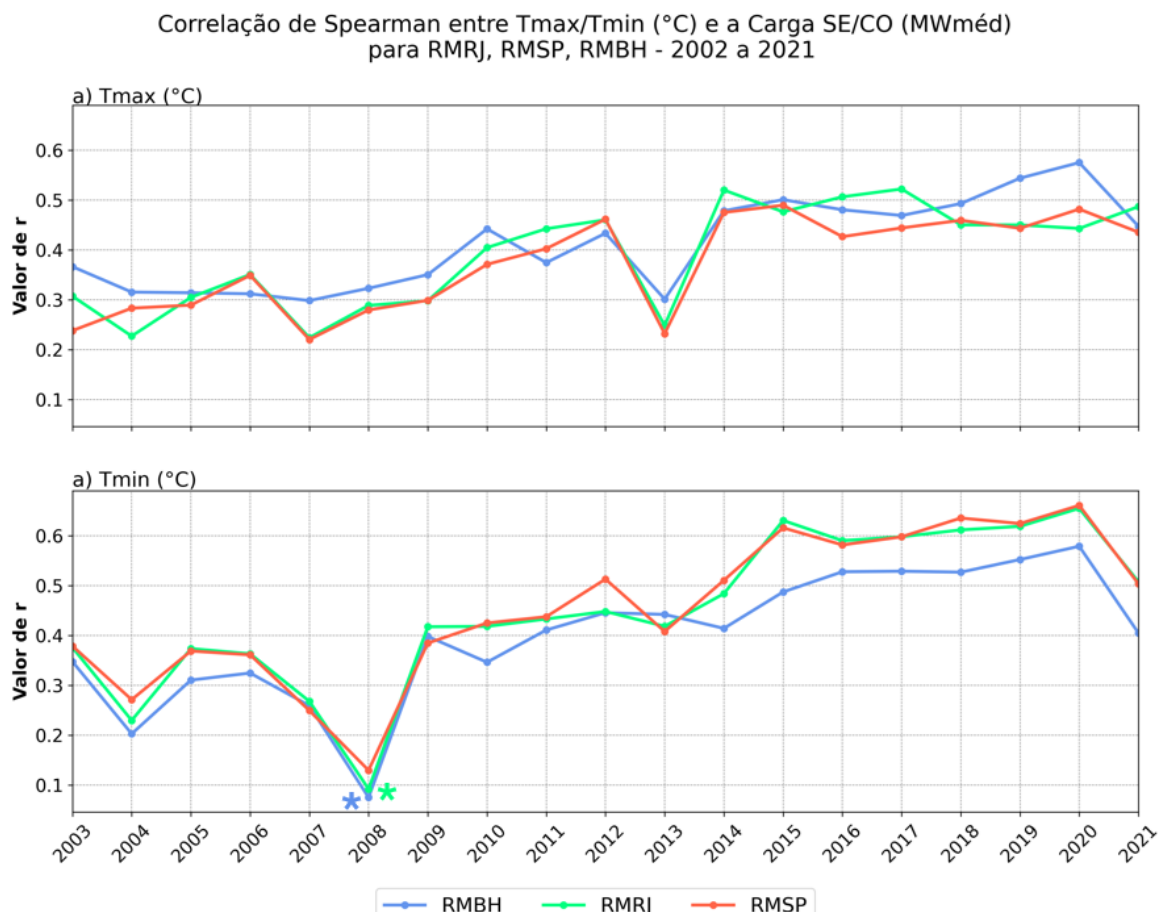


Figura 4.25: Evolução temporal da correlação de Spearman calculada entre os valores de temperatura (letra a para Tmax e letra b para tmin) e a carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO para cada ano no período de 2003 a 2021. Os asteriscos demarcam apenas as correlações sem significância estatística (valor de p-value acima de 0.05), as demais correlações apresentem significância estatística com nível de confiança de 95%.

Em virtude da ocorrência da pandemia de COVID-19 e as correlações mais robustas entre as variáveis em análise a partir do ano de 2010, além dos efeitos de maior penetração e utilização de aparelhos de ar-condicionado (BEZERRA et al., 2021, 2022; PAVANELLO

et al., 2021), a Figura 4.26 ilustra graficamente as relações entre as variáveis Tmax e Tmin de RMBH e a carga normalizada do Subsistema SE/CO separados por dois períodos: 1) jan/2010 a fev/2022, com exceção de 2020; e 2) série de dados do ano de 2020. Além disso, foram sinalizados os eventos extremos e severos dos eventos extremos de temperatura, segregando por dias úteis e finais de semana/feriados (levando em consideração a menor demanda de energia elétrica durante esses dias). Ao analisar os efeitos de Tmax (Figura 4.26, letras a e b), nota-se que de modo geral, eventos de OC's diurnas extremos ou severos ocasionam elevação da carga normalizada do Subsistema SE/CO, especialmente para eventos em que há valores de Tmax acima de 30°C, tanto para dias úteis quanto para dias de final de semana ou feriado. De forma complementar, eventos de OF's diurnas possuem o efeito contrário: potencial de redução da carga de energia elétrica do SE/CO, sem distinção de dias úteis ou não, especialmente para casos em que Tmax esteve baixo de 25°C. Já para o caso de Tmin (Figura 4.26, letras c e d), é possível reparar que eventos de OC's noturnas com Tmin acima de 20°C podem ocasionar elevação da carga normalizada do Subsistema SE/CO. Além disso, eventos de OF's noturnas com valores de Tmin abaixo de 15°C estão relacionados com valores mais discretos da carga normalizada do Subsistema SE/CO. De maneira complementar, vale destacar que retirando o ano com efeitos mais marcados da pandemia de COVID-19 sobre a carga de energia elétrica (Figura 4.26, letra a).

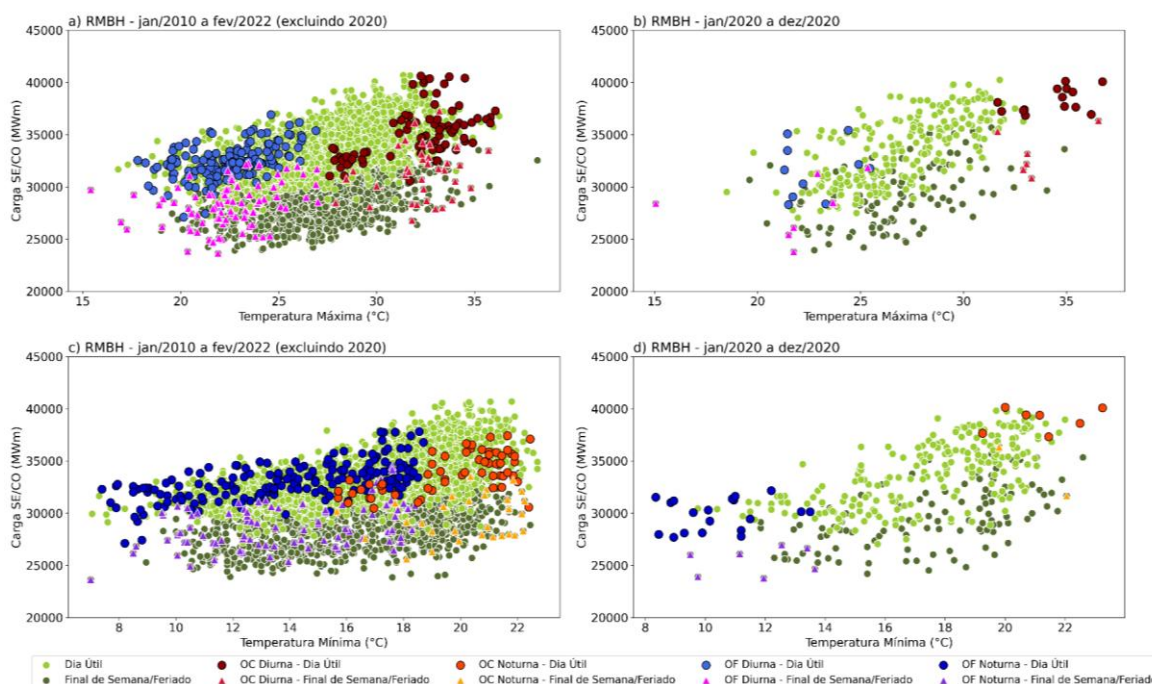


Figura 4.26: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMBH, destacando os dias úteis, finais de semana e feriados, OC's diurnas e noturnas e OF's diurnas e noturnas, para dois períodos distintos: jan/2010 a fev/2022, com exceção do ano de 2020 (letras a e c); apenas o ano de 2020 (letras b e d).

Para o RMRJ, ao analisar os efeitos de Tmax (Figura 4.27, letras a e b), nota-se que a ocorrência de OC's diurnas severas e/ou extremas com de Tmax acima de 35°C estão relacionados com valores mais elevados da carga normalizada do Subsistema SE/CO, tanto para dias úteis quanto para dias com a carga naturalmente mais reduzida durante finais de semana e feriados. No entanto, ao analisar o contexto de 2020, não houve registro de OC's diurnas severas e/ou extremas. Já para o contexto de OF's diurnas severas e/ou extremas, eventos com Tmin abaixo de 27,5°C estão associados com valores mais discretos da carga do SE/CO.

Já para conferir os efeitos de Tmin (Figura 4.27, letras c e d), os eventos de OC's noturnas com valores de Tmax acima de 23°C podem provocar elevação da carga normalizada do Subsistema SE/CO, assim como eventos de OF's noturnas com valores de Tmin abaixo de 19°C podem produzir valores relativamente mais baixos de carga normalizada do Subsistema SE/CO, seja por dias úteis ou finais de semana e feriados.

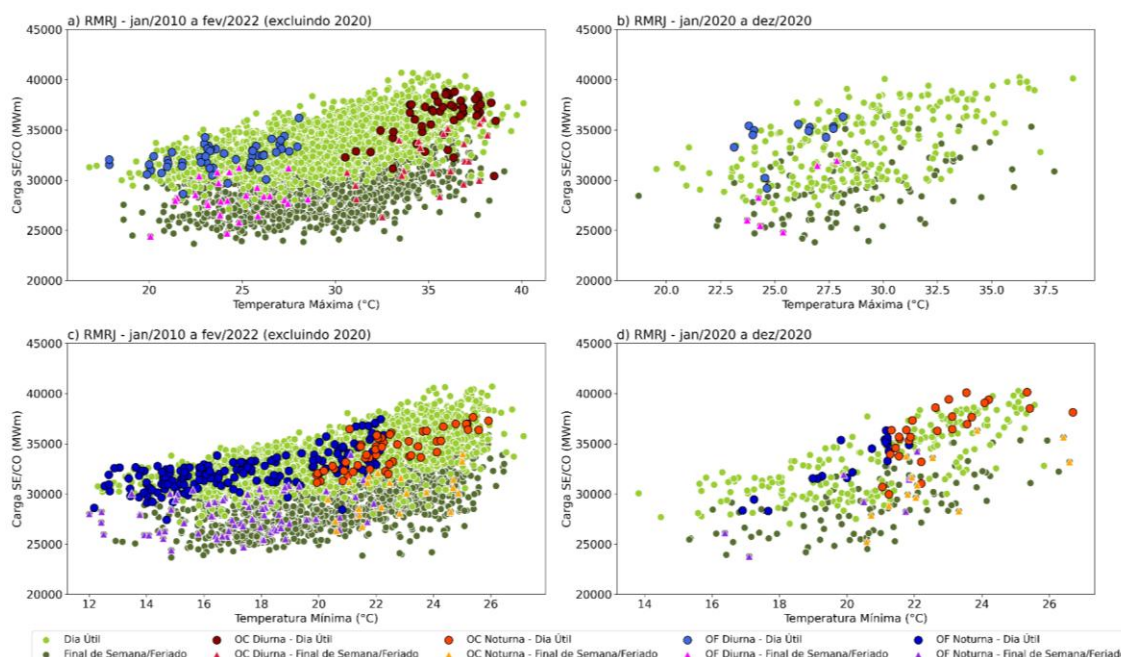


Figura 4.27: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMRJ, destacando os dias úteis, finais de semana e feriados, OC's diurnas e noturnas e OF's diurnas e noturnas, para dois períodos distintos: jan/2010 a fev/2022, com exceção do ano de 2020 (letras a e c); apenas o ano de 2020 (letras b e d).

Já para o RMSB e ao considerar as relações de Tmax (Figura 4.28, letras a e b), os eventos de OC's diurnas severas e/ou extremas com valores de Tmax acima de 30°C produzem valores mais elevados de carga normalizada do Subsistema SE/CO. No caso de OF's diurnas severas e/ou extremas ocorrem majoritariamente com valores de Tmax abaixo de 25°C, sinalizando valores mais discretos de carga de energia elétrica do SE/CO. Ao verificar o caso de 2020 (Figura 4.28, letra b), observa-se o registro de OC's diurnas severas e/ou extremas, mas sem provocar valores significativamente elevados de casos.

Ao considerar os efeitos de Tmin sobre a carga normalizada do Subsistema SE/CO (Figura 4.28, letra c e d), padrões são similares ao que foi observado para RMBH e RMRJ (Figuras 4.26 e 4.27, respectivamente). Nessa ocasião, repare-se que valores de Tmin acima de 17,5°C concentram a maior parte das ocorrências de OC's noturnas severas e/ou extremas, assim como valores mais expressivos de carga. De forma complementar, os valores mais discretos de carga ficam concentrados quando Tmin fica abaixo de 15°C, como também a maior ocorrência de OF's noturnas severas e/ou extremas. De maneira complementar, há um padrão em comum observado entre as Regiões Metropolitanas além do que já foi comentado

previamente. No caso de Tmax para RMBH (Figura 4.26, letra a), é possível observar alguns eventos de OC's diurnas em uma faixa intermediária dos valores de carga normalizada do Subsistema SE/CO, sem indicar qualquer tipo de desvio relevante. O mesmo ocorre para todas as regiões ao verificar o comportamento de Tmin (Figuras 4.26, 4.27 e 4.28, letra c), com registro de OC's e OF's nessa mesma faixa intermediária de carga. Nesse sentido, será necessário investigar com mais detalhes o contexto deste padrão, apesar da ocorrência de eventos extremos de calor e frio.

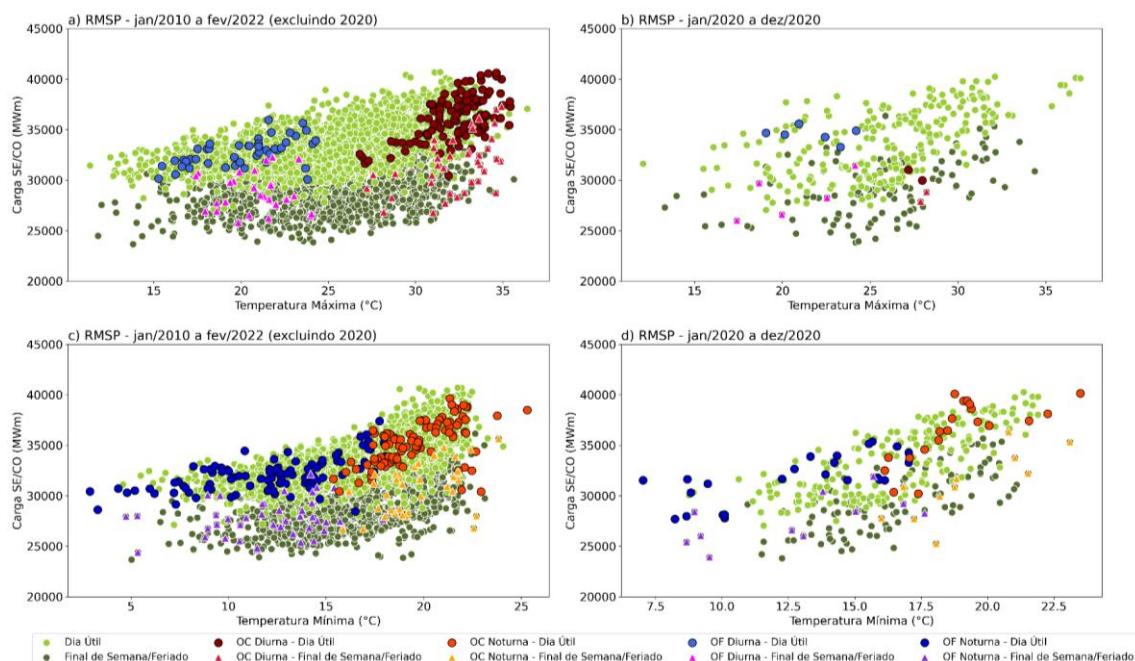


Figura 4.28: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMSP, destacando os dias úteis, finais de semana e feriados,

OC's diurnas e noturnas e OF's diurnas e noturnas, para dois períodos distintos: jan/2010 a fev/2022, com exceção do ano de 2020 (letras a e c); apenas o ano de 2020 (letras b e d).

#### **4.6 Estudo de caso 1: alterações na Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO em decorrência da OF ocorrida em maio de 2020**

Esta seção é dedicada a investigar a ocorrência de uma OF ocorrida entre os dias 05 e 12 de maio de 2020 que afetou de forma simultânea as três Regiões Metropolitanas abordadas no presente estudo, provocando reduções nos valores da carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO. A análise será conduzida por meio de gráficos de Tmax e Tmin das Regiões Metropolitanas de interesse, além da carga do Subsistema SE/CO. Adicionalmente, gráficos de dispersão foram elaborados demarcando os Eventos de Frio de Extremo, utilizando as variáveis de temperatura e carga do Subsistema SE/CO. Por fim, será conduzida uma análise sinótica por meio de compósitos gerados para o período da OF em questão, bem como os perfis verticais da troposfera.

De acordo com a Tabela 4.1, a OF ocorreu de forma simultânea entre as Regiões Metropolitanas, registrada entre 05 e 12 de maio de 2020 e, em aspecto gerais, teve duração de 8 dias. No caso de RMBH, a OF em questão foi registrada tanto com Tmax, quanto com Tmin; ou seja, para essa localidade, houve eventos simultâneos de OF Diurna e OF Noturna. O evento de frio diurno (valores de Tmax abaixo do limiar CTX10pct para a respectiva região) foi registrada entre os dias 07 e 11 de maio de 2020 perdurando por 5 dias, já a parte noturna do evento (valores de Tmin abaixo do limiar CTN10pct para a área em questão) foi observada entre os dias 09 e 12 de maio de 2020, com total de 4 dias de frio extremo. Para RMRJ, o evento ocorreu no período noturno, perdurando por 5 dias, iniciando no dia 08 de maio e término no dia 12 de maio de 2020. Assim como o caso de RMRJ, na área de RMSP houve registro de uma OF noturna, ocorrido entre os dias 10 e 12 de maio de 2020, com duração de 3 dias. De modo geral, ao considerar esses casos como uma OF generalizada, é possível classificar como um evento severo, dada a persistência média acima de 4 dias entre todas as regiões de interesse. A exceção fica para RMSP, onde a OF teve durabilidade de apenas 3 dias, categorizando o evento como moderado ao considerar apenas a perspectiva local.

Tabela 4.1: Estatísticas gerais do comportamento da temperatura durante a OF simultânea ocorrida em RMBH, RMRJ e RMSP, entre 05 de maio de 2020 e 12 de maio de 2020.

Evento de Frio Extremo - 05 a 12 de maio de 2020							
Região Metropolitana	Tipo de Evento	Valor Médio de Temperatura	Valor Médio do Limiar	Desvio Temp. vs. Limiar	Climatologia	Anomalia	Duração
RMBH	OF Noturna	11,45°C	13,12°C	-1,66°C	15,75°C	-4,30°C	09/02/2020 a 12/05/2020
RMRJ	OF Noturna	17,05°C	17,07°C	-0,53°C	19,71°C	-2,66°C	08/05/2020 a 12/05/2020
RMSP	OF Noturna	11,63°C	12,40°C	-0,77°C	14,82°C	-3,19°C	10/05/2020 a 12/05/2020
RMBH	OF Diurna	22°C	23,95°C	-1,95°C	26,45°C	-4,45°C	07/05/2020 a 11/05/2020

Pela Figura 4.29, é possível observar a evolução temporal do evento de OF simultâneo entre as regiões em estudo. Para RMBH (Figura 4.29, letra a) houve registro de Tmin variando de 11,20 a 11,95°C durante o episódio de frio e, de acordo com a Tabela 4.1, os valores de Tmin ficaram, em média, 1,65°C abaixo do limiar extremo CTN10pct, representando anomalias negativas na ordem de -4,30°C. Além disso, a região RMBH também registrou uma OF diurna, com valores de Tmax variando de 21,50 a 23,30°C e, conforme a Tabela 4.1, os valores dessa métrica de temperatura ficaram, em média, 1,95°C abaixo do limiar CTX10pct, com anomalias negativas de -4,45°C. No caso de RMRJ (Figura 4.29, letra b, e Tabela 4.1), os valores de Tmin variaram de 16,38 a 17,66°C durante este evento de OF noturna, com uma média de 0,5°C abaixo do limiar CTN10pct, registrando, em média, anomalias negativas de -2,66°C durante o evento. Além disso, foi observado que a variável Tmax esteve abaixo do limiar extremo CTX10pct nos primeiros dias do evento (Figura 4.29, letra b), com valores abaixo de 24°C, mas que não atingiu os critérios mínimos para caracterizar como uma OF diurna. Já para RMSP (Figura 4.29, letra c e Tabela 4.1), houve registro de Tmin entre 11,17 e 13,07°C e que, em média, variou por volta de 0,8°C abaixo do limiar CTN10pct da respectiva região durante o evento de OF em questão e, em média, indicando anomalias negativas na ordem de -3,19°C. Similarmente ao caso de RMRJ, também foi observado que Tmax variou abaixo do limiar CTX10pct no primeiro dia do período em que foi observado o evento de frio extremo (Figura 4.29, letra c), com valor abaixo de 19,5°C, mas sem cumprir com os critérios para a caracterização de um evento de OF diurno, sendo classificado apenas como evento diurno pontual de frio extremo.

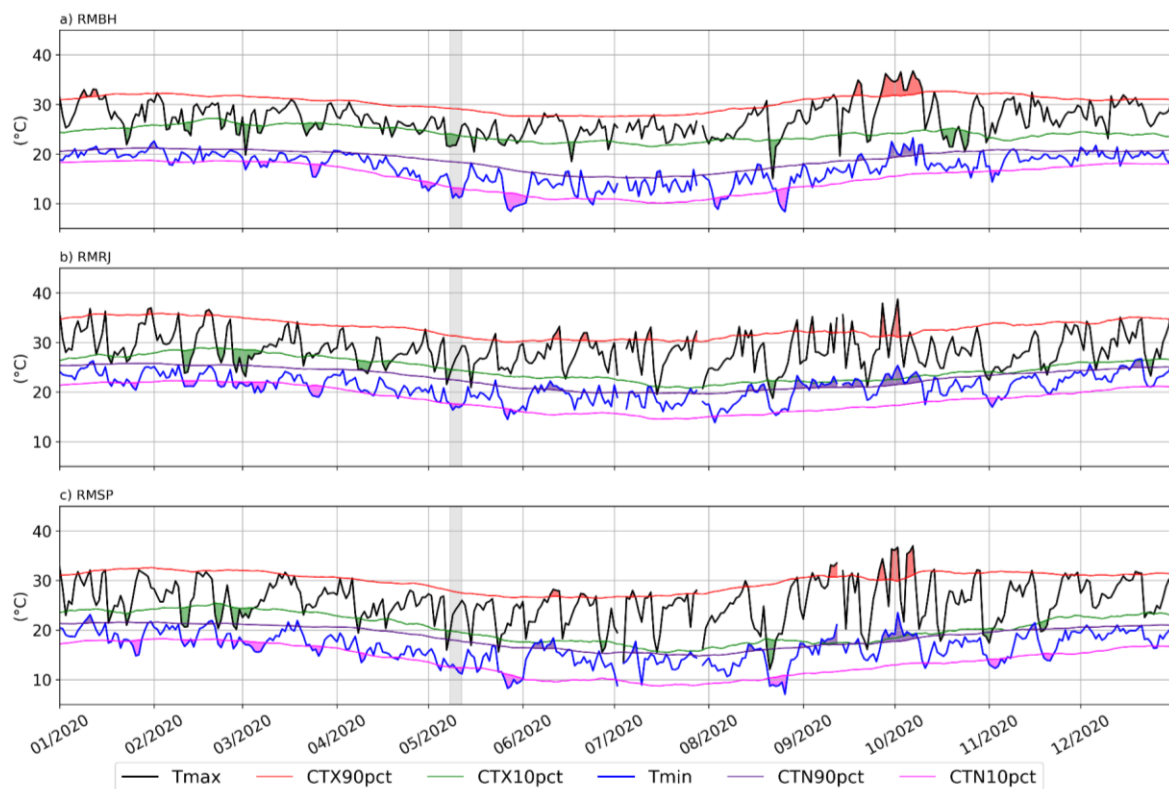


Figura 4.29: Comportamento de Tmax e Tmin durante o ano de 2020 em RMBH (letra a), RMRJ (letra b) e RMSP (letra c). As tarjas cinzas destacam o evento de OF generalizada ocorrida entre as regiões durante maio deste ano e o evento de OC extremo registrado entre setembro e outubro de 2020. As áreas preenchidas em vermelho e roxo destacam valores de Tmax e Tmin acima dos limiares CTX90pct e CTN90pct, respectivamente. Já as áreas destacadas em verde e lilás, indicam os valores de Tmax e Tmin abaixo dos limiares CTX10pct e CTN10pct, nesta ordem.

Neste sentido, a Figura 4.30, o comportamento da carga normalizada do SE/CO durante o ano de 2020, assim como os limiares extremos baseados nos percentis 90 e 10, adicionalmente o Evento de Frio Extremo analisado está destacado por uma tarja cinza. Dessa forma, é possível observar forte redução da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante a ocorrência do episódio de OF generalizada entre as Regiões Metropolitanas de análise e ao confrontar com um padrão médio da Carga durante o período da OF em questão, verificou-se um desvio em cerca de -1.665MW médios abaixo do limiar do percentil 10, caracterizando forte declínio.

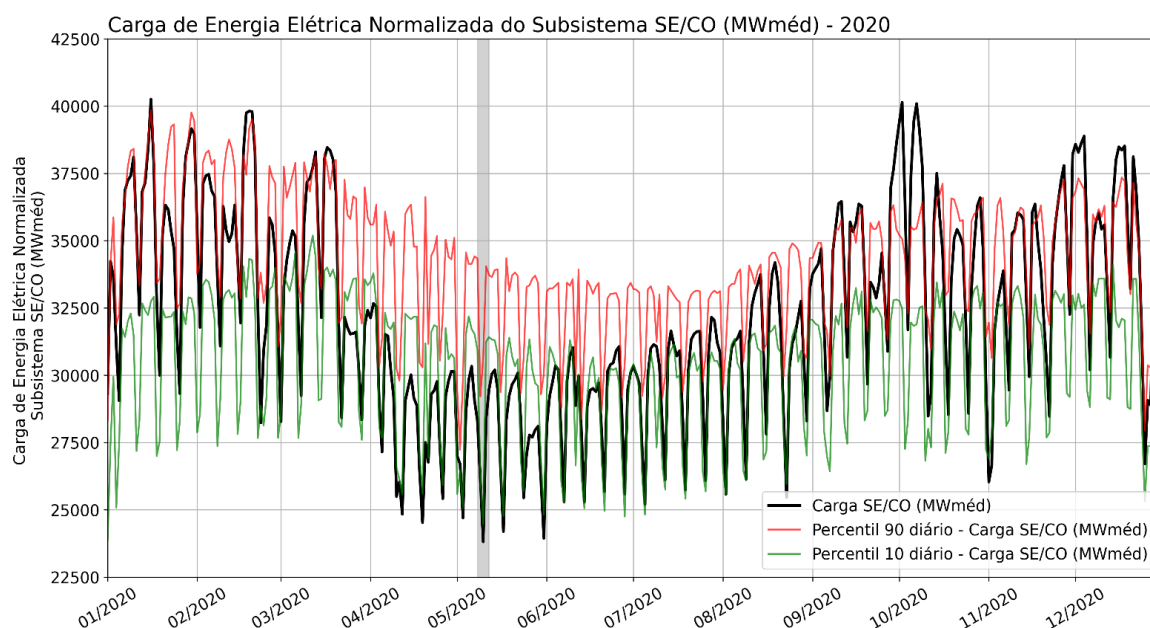


Figura 4.30: Comportamento da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante o ano de 2020. As linhas vermelha e verde indicam os limiares extremos baseados nos percentis 90 e 10, respectivamente. As tarjas cinzas destacam o evento de OF generalizada ocorrido em maio de 2020.

A Figura 4.31 exibe o gráfico de dispersão entre  $T_{max}$  e  $T_{min}$  de cada Região Metropolitana de análise e a carga normalizada do Subsistema SE/CO, destacando os Eventos de Frio Extremo ocorridos em cada localidade, sinalizando eventos diurnos e noturnos. Em um aspecto geral, as relações entre a variável de  $T_{max}$  das Regiões Metropolitanas e a carga normalizada do Subsistema SE/CO (Figura 4.31, letras a, c, e) possuem comportamento com forma próxima a linear, indicando que ao passo que os valores de  $T_{max}$  se elevem (reduzam) nessas localidades, há uma resposta de elevação (redução) da carga normalizada do Subsistema SE/CO. No entanto, ao conferir essa relação com os valores de  $T_{min}$  das áreas em questão (Figura 4.31, letras b, d, f), há um comportamento um pouco distinto, com forma similar a “cauda direita” de uma função matemática de segunda ordem com coeficiente positivo; ou seja, o comportamento segue algo similar a metade direita de um formato “U-shape”, porém com forma mais suavizada. Analisando o evento da OF generalizada em questão, inicialmente chama atenção de que houve a ocorrência de dias mais frios durante o ano, seja com  $T_{max}$  ou  $T_{min}$ , entre as Regiões Metropolitanas em comparação com os dias em que foram destacados os casos de OF’s registrados. Porém,

mesmo com esses dias ainda mais frios, não é possível verificar que a resposta de redução de carga foi ainda mais expressiva em relação aos eventos de OF's analisados; ou seja, pode sugerir que abaixo de um certo valor de temperatura, a resposta de redução de carga se torne mais branda.

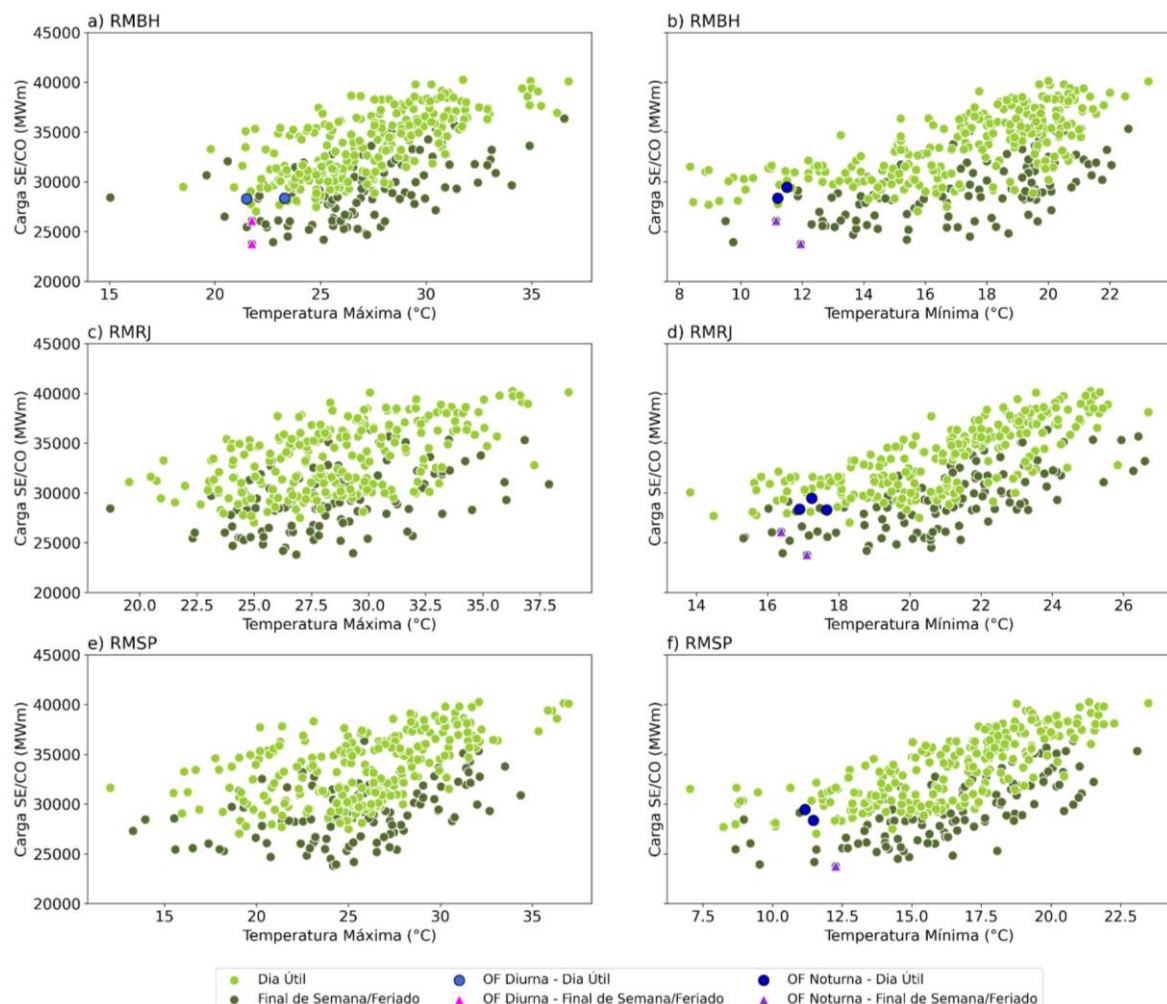


Figura 4.31: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica Normalizada do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMBH (letras a e b), RMRJ (letras c e d) e RMSP (letras e e f), destacando os dias úteis, finais de semana e feriados durante o ano de 2020, além de indicar os eventos de OF's e OC's em análise ocorridos simultaneamente entre as Regiões Metropolitanas de estudo.

A Figura 4.32 representa os compósitos relativos ao evento de OF analisado nesta seção, considerando as seguintes variáveis: Na letra a, estão HGT500, UV500 e T850; Letra b, ROC e ROL; Letra c, UV850 e PREC; letra d, T2M e MSL. Iniciando pelas variáveis representados na Figura 4.32, letra a, durante o Evento de Frio Extremo de maio de 2020, é possível perceber a presença de anomalias negativas de T850 atuando em áreas que

abrangem as Regiões Metropolitanas de interesse e sobre o Oceano Atlântico Tropical e parte Subtropical, além de regiões mais próximas a latitude de 60°S. Porém, nota-se a presença de anomalias positivas sobre o estado do Rio Grande do Sul, Chile, Argentina e áreas do Oceano Atlântico extratropical, assim como para o Oceano Pacífico, representando um padrão de dipolo de T850. Analisando os ventos no nível de 500hPa (UV500), há uma ligeira curvatura, na altura do litoral da região Sudeste do Brasil, o que sugere a estrutura de um cavado de baixa amplitude e que pode estar associado a passagem de uma frente fria sobre o oceano. Adicionalmente, pelos contornos de HGT500, há a presença de dois centros de anomalias positivas, sendo o primeiro mais posicionando sobre o Oceano Pacífico Subtropical, Chile e Argentina, e o segundo centro de anomalias positivas de HGT500 posicionado entre o Oceano Atlântico e a costa do Sudeste brasileiro. Porém, sobre o sul da América do Sul e no interior do Oceano Atlântico Extratropical, há a presença de anomalias negativas de HGT500.

Essa configuração sugere que os sistemas de alta pressão marcados por anomalias positivas de HGT500, atuaram de forma a impedir que novos sistemas frontais ou centros de baixa pressão se aproximem da Região Sudeste do Brasil, fornecendo mais condições para que a massa de ar anormalmente frio (representada por T850) atuasse por mais tempo sobre parte do sudeste e nordeste brasileiro. Nesse sentido, essa mesma configuração, sugere que outras frentes frias avançam mais ao Sul e com aspecto zonal, dentro do intervalo de latitude de 40°S a 60°S, podendo ser um efeito da presença de sistemas de alta pressão impedindo um deslocamento com componente meridional mais marcado. Avaliando ROC e ROL à superfície (Figura 4.32, letra b), percebe-se que boa parte do centro-sul do Brasil, onde estão localizadas RMBH, RMRJ e RMSP, há presença de anomalias negativas de ROL e positivas de ROC à superfície, sugerindo que há menor cobertura de nebulosidade, refletindo em maiores fluxos de radiação de onda longa emitida pela superfície e de radiação de onda curta chegando à superfície. Além do mais, no setor centro-norte do país, há uma inversão de padrões; ou seja, presença de anomalias positivas de ROL e negativas de ROC à superfície (Figura 4.32, letra b), sendo um indicativo para atuação da nebulosidade de forma mais homogênea.

Analisando UV850 (Figura 4.32, letra c), destaca-se o comportamento de UV850 apresenta giro anti-horário ou anti ciclônico entre o Oceano Atlântico e áreas que compreendem o sudeste brasileiro, indicando a presença de um sistema de alta pressão

anômalo em baixos níveis da troposfera. Adicionalmente, é possível perceber a atuação de giros anticiclônicos sobre o Oceano Pacífico e giros ciclônicos (indicando presença de sistemas de baixa pressão) próximos a latitude de 60°S. Esse padrão observado é coerente com o que foi comentado previamente a respeito do campo de HGT500 (Figura 4.32, letra a). Já para PREC (Figura 4.32, letra c), é possível notar anomalias ligeiramente negativas próximo das regiões de interesse, sugestionando que a massa de ar anomalmente frio, também era relativamente seca. No entanto, áreas com anomalias positivas são demarcadas sobre o oceano e próximo do litoral do Nordeste brasileiro, concordando com os comentários anteriores sobre a passagem de uma Frente Fria de caráter mais oceânico. Além disso, nota-se anomalias ligeiramente positivas de PREC em áreas do estado de Mato Grosso do Sul, trechos do Nordeste argentino e no estado do Rio Grande do Sul, com escoamento de UV850 indicando possível atuação da borda oeste de sistemas de alta pressão e/ou ação similar ao Jato de Baixos Níveis (JBN) transportando mais umidade para essas áreas, corroborando com a possibilidade de sistemas transientes com deslocamento mais ao Sul e ter provocado alguma resposta no escoamento de baixos níveis, com tentativa de possível conexão ao escoamento de sistemas de baixa pressão se deslocando mais ao Sul.

Ao conferir os campos de T2M e MSL (Figura 4.32, letra d), basicamente ocorre o reflexo do que já abordado para as métricas anteriores. De modo geral, é possível notar anomalias positivas de MSL atuando sobre áreas que cobrem as regiões de interesse, indicando o reforço de sistemas de alta pressão sobre esse setor do Brasil, além de que há presença de anomalias negativas de T2M sobre a mesma área do Brasil, sendo indicativo de um sistema de alta pressão migratório pós-frontal. Sobre o Oceano Pacífico, nota-se anomalias positivas de MSL, indicativo de sistemas de alta pressão anômalos. Em contrapartida, entre as latitudes de 40°S e 60°S, é possível perceber anomalias negativas de MSL predominando sobre esse setor, sinalizando atuação de sistemas de baixa pressão e/ou atividade ciclônica anômala. De maneira complementar, nota-se que há anomalias positivas de T2M sobre boa parte do Chile, Argentina e o estado do Rio Grande do Sul. Em resumo, esse aquecimento anômalo pode ser reflexo do aquecimento pré-frontal ao passo que há passagem de sistemas de baixa pressão, associados a frentes frias, entre 40°S e 60°S, e que o deslocamento dos transientes mais ao sul pode ser efeito de anomalias positivas de HGT500 (Figura 4.32, letra a).

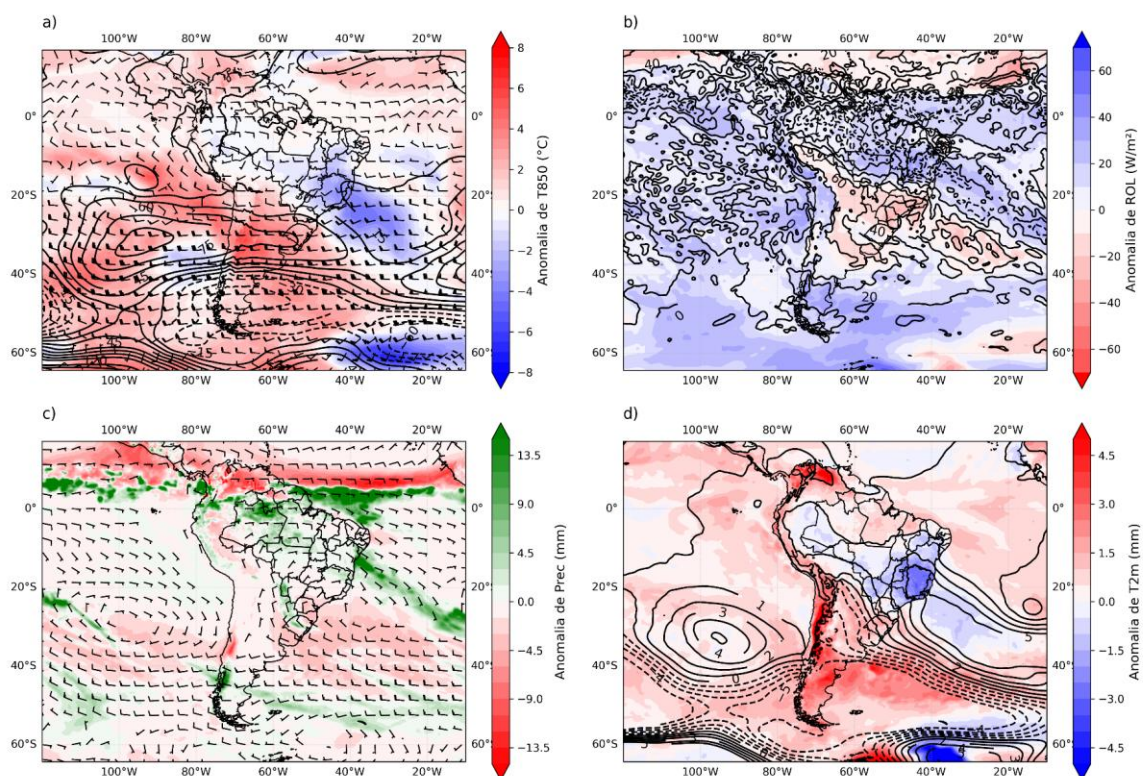


Figura 4.32: Compósitos para o Evento de OF generalizado entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 05 e 12 de maio de 2020. Na letra a, estão representadas as variáveis de HGT500 (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas), UV500 (barbelas) e T850 (shadded). Na letra b, estão representadas as variáveis ROC (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas) e ROL (shadded) à superfície. Já na letra c, há indicação das variáveis PREC (shadded) e UV850 (barbelas). E a letra d, representa os campos de T2M (shadded) e MSL (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas).

A Figura 4.33, representa os compósitos dos perfis verticais da troposfera (1000hPa a 200hPa) dos movimentos verticais, representados por W (velocidade vertical) e de TAR (temperatura do ar), sendo os perfis verticais são representados em secções zonais (Figura 4.33, letras b e d) e em secções meridionais (Figura 4.33, letras a e c).

Analisando o perfil vertical de W na troposfera e sob a perspectiva meridional (Figura 4.33, letra a), é perceptível que sobre os arredores das Regiões Metropolitanas estudadas, posicionadas entre as latitudes de 34°S e 20°S (RegLat1), há anomalias positivas de W e que se estende por praticamente toda a coluna vertical, indicando movimentos subsidentes

anômalos por boa parte dessa extensão. Porém, para latitudes mais ao sul, entre 47.5°S e 35°S (RegLat2), existe a presença de anomalias negativas de W, representando movimentos ascendentes anômalos na estrutura vertical da troposfera. Ainda sobre a perspectiva meridional do perfil vertical da troposfera, agora analisando a variável TAR (Figura 4.33, letra c), é perceptível a presença de anomalias negativas de TAR que se estende por praticamente toda a coluna entre 37.5°S e 15°S, abrangendo totalmente a região nomeada por RegLat1, especialmente em altos e baixos níveis da troposfera. Já pelo aspecto zonal de W (Figura 4.33, letra b), sob a ótica mais centrada nas latitudes das áreas de estudo (entre 20°S e 26°S), grande parte da estrutura vertical da troposfera marca movimentos descendentes mais fortes que o normal e representados por anomalias positivas de W, especialmente entre 55°O e 30°O (RegLon), porém em um pequeno intervalo de longitudes é possível perceber anomalias negativas de W, nos arredores de 55°O e 57.5°O, coincidindo com as áreas em que houve registro de alguma ocorrência de precipitação, conforme sinalizado anteriormente. Já pela ótica zonal da variável TAR (Figura 4.33, letra d), graficamente não é tão diferente do que já foi observado pela ótica meridional de TAR (Figura 4.33, letra c); ou seja, há anomalias negativas de TAR por boa parte da extensão vertical da troposfera entre intervalos de longitude de RegLon que abrangem as áreas de estudo e com indicativo de anomalias expressivas entre níveis mais altos e, especialmente, em níveis mais baixos da troposfera.

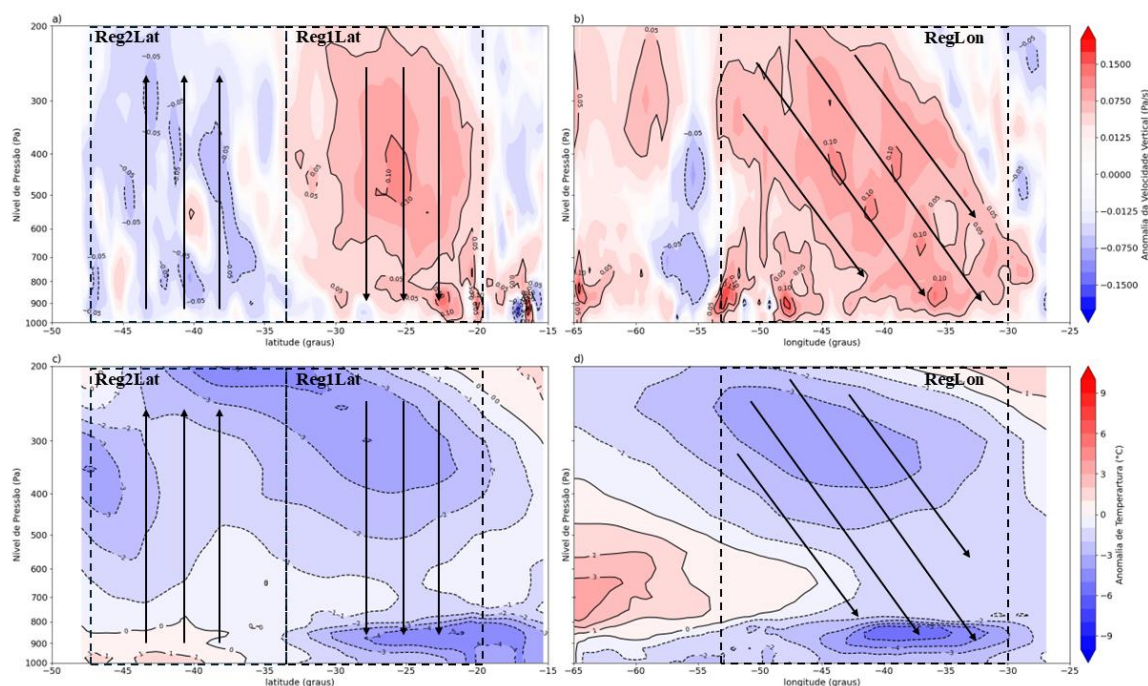


Figura 4.33: Compósitos para os movimentos verticais da troposfera representados por W (letras a e b), além da estrutura vertical de TAR (letras c e d) para o evento de OF generalizado entre RMBH, RMRJ e RMSF, ocorrido entre 05 e 12 de maio de 2020. Nas letras a e c, o perfil vertical da troposfera possui caráter meridional, centrada entre as longitudes de 40°O e 60°O, variando entre as latitudes de 50°S e 15°S. Nas letras b e d, o perfil vertical da troposfera possui caráter zonal, centrada entre as latitudes de 20°S e 26°S, variando entre as longitudes de 65°O e 27°O.

#### 4.7 Estudo de caso 2: alterações na Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO em decorrência da OC ocorrida entre setembro e outubro de 2020

Nesta seção, será abordado o caso de uma OC generalizada entre as Regiões Metropolitanas de interesse do presente estudo. O Evento de Calor Extremo ocorreu entre os dias 26 de setembro e 10 de outubro de 2020 e foi precursor para a elevação da carga normalizada do Subsistema SE/CO de forma expressiva. A análise será elaborada de forma semelhante ao discorrido na seção anterior (Capítulo 4, seção 4.6), sendo guiada por gráficos de Tmax e Tmin das Regiões Metropolitanas de interesse, além da carga do Subsistema SE/CO. De maneira complementar, gráficos de dispersão foram produzidos usando as variáveis de temperatura e carga, destacando os Eventos de Calor de Extremo. E, por último,

a análise sinótica por meio de compósitos gerados para o período da OC em questão, além dos perfis verticais da troposfera.

Analisando a Tabela 4.2, o Evento de Calor Extremo e generalizado entre as Regiões Metropolitanas, ocorrido entre 26 de setembro de 10 de outubro de 2020, teve duração média de 15 dias, o que já indica o cenário extremo. Para RMBH, a OC foi registrada em períodos diurnos e períodos noturnos (detectada pelas variáveis Tmax e Tmin, usando os limiares CTX90pct e CTN90pct, respectivamente), registrando ocorrência simultânea de OC's diurnas e noturnas no mesmo período. Com relação ao evento diurno, o início foi marcado no dia 27 de setembro e término no dia 10 de outubro de 2020, com o total de 14 dias em OC diurna. No caso do episódio de calor noturno, o começo do evento foi menos duradouro, iniciando no dia 29 de setembro de 2020 e encerrando no dia 07 de outubro de 2020, totalizando 10 dias em OC noturna. Avaliando o caso de RMRJ, o Evento de OC diurna, durou apenas 3 dias, com início no dia 30 de setembro e término no dia 02 de outubro de 2020. Já o evento de OC noturna foi mais duradouro, persistindo por 13 dias, registrando o começo do episódio no dia 27 de setembro e finalizando no dia 09 de outubro de 2020. Já para RMSP, o caso é diferente dos demais, já que houve o registro de três eventos de OC's diurnas e de um evento de OC noturna. Com relação ao primeiro caso de OC diurna registrada em RMSP, o marco inicial ocorreu no dia 26 de setembro e encerramento no dia 28 de setembro de 2020, perdurando por 3 dias. Sobre o segundo caso de OC diurna, o evento ocorreu entre os dias 30 de setembro e 02 de outubro de 2020, com duração de 3 dias. No último caso de OC diurna, o episódio de calor extremo teve início no dia 05 de outubro e fim no dia 07 de outubro de 2020, também durando 3 dias. Já a OC noturna, iniciou no dia 27 de setembro e terminou no dia 08 de outubro de 2020, com a mesma duração do evento diurno; ou seja, 12 dias.

Tabela 4.2: Estatísticas gerais do comportamento da temperatura durante a OC generalizada ocorrida em RMBH, RMRJ e RMSP, entre 26 de setembro de 2020 e 10 de outubro de 2020.

Evento de Calor Extremo – 26 de setembro a 10 de outubro de 2020							
Região Metropolitana	Tipo de Evento	Valor Médio de Temperatura	Valor Médio do Limiar	Desvio Temp. vs. Limiar	Climatologia	Anomalia	Duração
RMBH	OC Diurna	34,76°C	31,9°C	+2,87°C	28,11°C	+6,64°C	27/09/2020 a 10/10/2020
RMRJ	OC Diurna	35,27°C	31,23°C	+4,03°C	26,19°C	+9,07°C	30/09/2020 a 02/10/2020
RMSP	OC Diurna 1	32,49°C	30,10°C	+2,38°C	23,80°C	+8,68°C	26/09/2020 a 28/09/2020
RMSP	OC Diurna 2	36,37°C	30°C	+6,37°C	24,14°C	+12,22°C	30/09/2020 a 02/10/2020
RMSP	OC Diurna 3	36,04°C	30,81°C	+5,23°C	25,19°C	+10,84°C	05/10/2020 a 07/10/2020
RMBH	OC Noturna	21,12°C	19,46°C	+1,66°C	17,82°C	+3,30°C	29/09/2020 a 07/10/2020
RMRJ	OC Noturna	23,30°C	21,57°C	+1,73°C	19,53°C	+3,77°C	27/09/2020 a 09/10/2020
RMSP	OC Noturna	19,67°C	17,83°C	+1,85°C	15,52°C	+1,88°C	27/09/2020 a 08/10/2020

A Figura 4.34 exibe o aspecto gráfico da evolução temporal do evento de OC em questão, sendo possível observar o comportamento de Tmax e Tmin de cada região de interesse, além de permitir comparação com os limiares utilizados para a detecção de EET's. Analisando mais a fundo a situação de RMBH (Figura 4.34, letra a, e Tabela 4.2), com relação ao evento de OC Diurna, os valores de Tmax variaram entre 32,9°C e 36,7°C, sendo que, em média, Tmax superou o limiar CTX90pct por cerca 2,9°C, representando anomalia positiva na ordem de 6,64°C. Já sobre o evento de OC noturna de RMBH, os valores de Tmin flutuam na faixa de 17,5°C a 23,2°C, ultrapassando o limiar CTN90pct (em média) por cerca de 1,66°C, registrando anomalias positivas de 3,30°C. Sobre a área de RMRJ (Figura 4.34, letra b, e Tabela 4.2), foram registrados um evento de OC diurna e outro de OC noturna. Para o caso da OC diurna, os valores de Tmax desempenharam na faixa de 32,02°C a 38,74°C, excedendo o limiar CTX90pct por cerca de 4,03°C (em média no período), além de registrar anomalias positivas na média de 9,07°C. Já para o evento de OC noturna registrada, os valores de Tmin variaram entre 21,9 e 25,3°C e que, em média, excedeu o limiar CTN90pct por volta de 1,7°C, além de anomalias positivas de Tmin com cerca de 3,77°C acima da média para o período. Já para a área de RMSP (Figura 4.34, letra

c, e Tabela 4.2), houve registro de quatro Eventos de Calor Extremo, sendo 3 episódios diurnos e um episódio noturno, sendo a região de maior peculiaridade e indicando certa composição de situações críticas de calor. Com relação ao primeiro episódio de OC diurna, houve registro de Tmax variando de 30,97°C a 34,36°C, excedendo, em média, o limiar CTX90pct por volta de 2,38°C e produzindo anomalias positivas expressivas, com valores de 8,68°C. Já sobre o segundo evento de OC diurna, a variável Tmax registrou valores na faixa de 36,06°C a 36,7°C, sendo que esses valores foram acima do limiar CTX90pct com média de 6,37°C e anomalias positivas para o período com valores expressivos de 12,22°C. Em sequência, durante o terceiro caso de OC diurna, os valores de Tmax oscilaram entre 35,33°C e 36,97°C, marcando valores que superaram, em média, o limiar CTX90pct por volta de 5,23°C e associado a anomalias positivas na faixa de 10,84°C. No que diz respeito ao caso da OC noturna registrada em RSMP, os valores de Tmin variaram de 18,7 a 23,5°C, superando o limiar CTN90pct por volta de 1,8°C, sendo associados a anomalias positivas na faixa de 1,88°C.

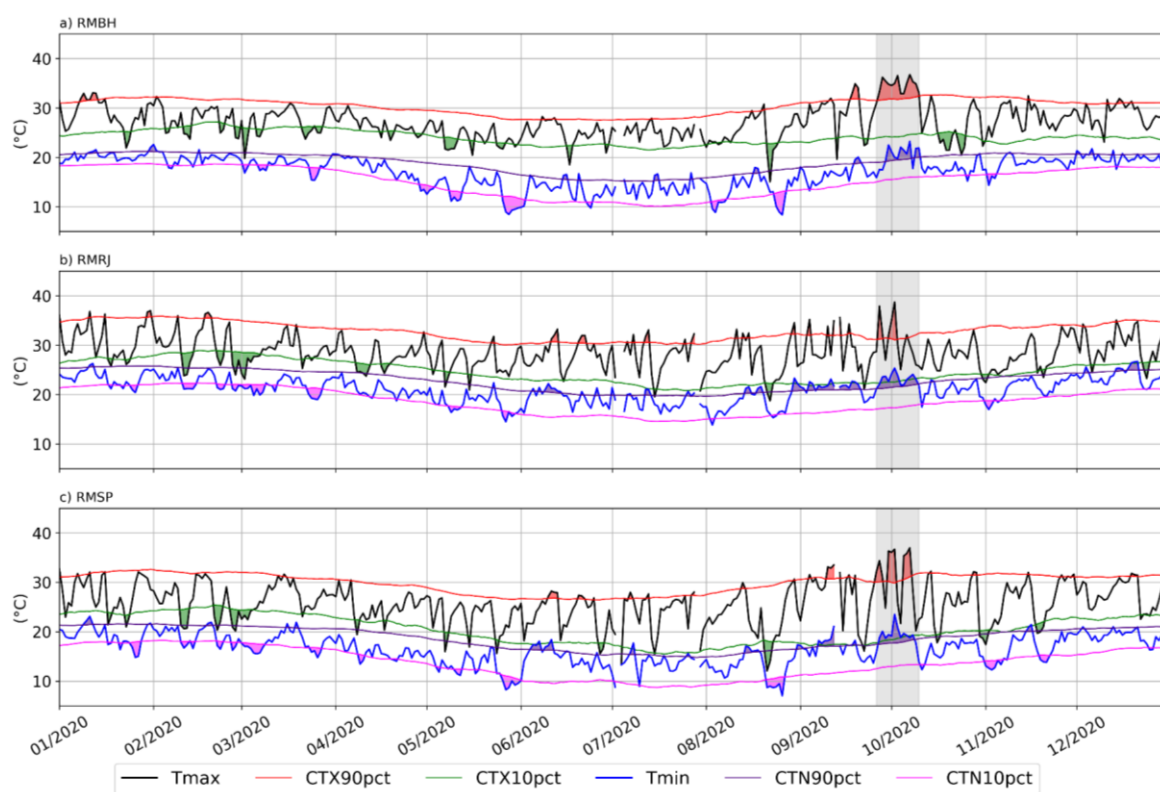


Figura 4.34: Comportamento de Tmax e Tmin durante o ano de 2020 em RMBH (letra a), RMRJ (letra b) e RMSP (letra c). As tarjas cinzas destacam o evento de OC generalizada

ocorrido entre as regiões durante maio deste ano e o evento de OC extremo registrado entre 26 de setembro de 2020 e 10 de outubro de 2020.

A Figura 4.35, demonstra como a carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO se comportou durante o ano de 2020, assim como os limiares extremos baseados nos percentis 90 e 10, destacando o período do episódio de Evento de Calor Extremo em tarja cinza. Nesse sentido, em virtude da elevação das temperaturas, sobretudo na RMSP, a carga normalizada do SE/CO apresentou elevação expressiva e ao confrontar com a média histórica da carga neste período, foi observado um desvio de +2.343Mwmédios, indicando o forte impacto do evento de calor sobre essa métrica.

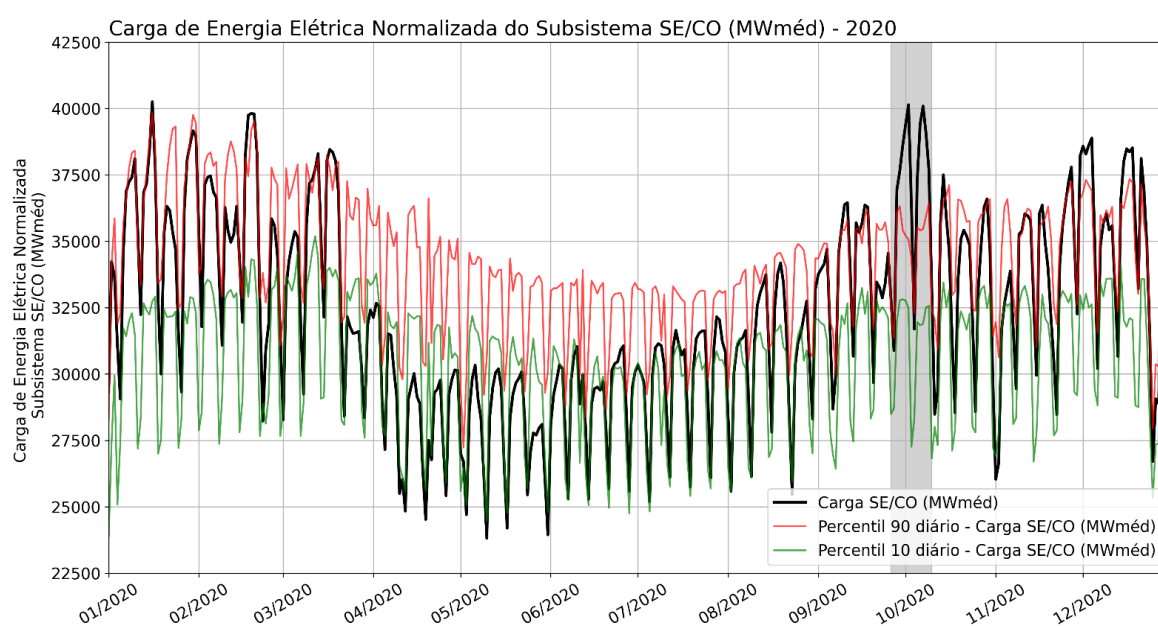


Figura 4.35: Comportamento da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante o ano de 2020. As linhas vermelha e verde indicam os limiares extremos baseados nos percentis 90 e 10, respectivamente. A tarja cinza destaca o evento de OC generalizada ocorrido entre setembro e outubro de 2020.

Similarmente ao que foi apresentado no estudo de caso anterior (Capítulo 4, seção 4.6), a Figura 4.36 representa os gráficos de dispersão entre Tmax e Tmin de cada Região Metropolitana de análise e a carga normalizada do Subsistema SE/CO, indicando os Eventos de Calor Extremo registrado em cada Região Metropolitana de análise, discriminando por OC's diurnas e OC's noturnas. Em linhas gerais, boa parte dos dias mais quentes registrados entre RMBH, RMRJ e RMSP (Figura 4.36, letras a, c e e) estiveram associados a recordes de Tmax e de carga registrados durante o período da OC generalizada em comparação com

outros dias desse mesmo ano, concentrando maior parte desses recordes em dias úteis, porém houve registro de recordes até mesmo datas de finais de semana/feriados, reforçando o grau de severidade das temperaturas, assim como a resposta expressiva da carga mediante a esse contexto. Porém, para as noites quentes entre as Regiões Metropolitanas (Figura 4.36, letras b, d e f), representadas pela variável  $T_{min}$ , nota-se que boa parte dos recordes de carga registrados durante o ano de 2020, não estiveram associados a recordes de  $T_{min}$  em noites de extremo calor, o que pode sugerir que a partir de certo valor de  $T_{min}$ , há uma resposta mais uniforme da carga. No entanto, é mais provável essa elevação da carga de forma expressiva seja uma situação conjuntural dado o contexto de Eventos Extremos de Calor ocorrendo em períodos diurnos e noturnos de forma quase simultânea entre as regiões de estudo.

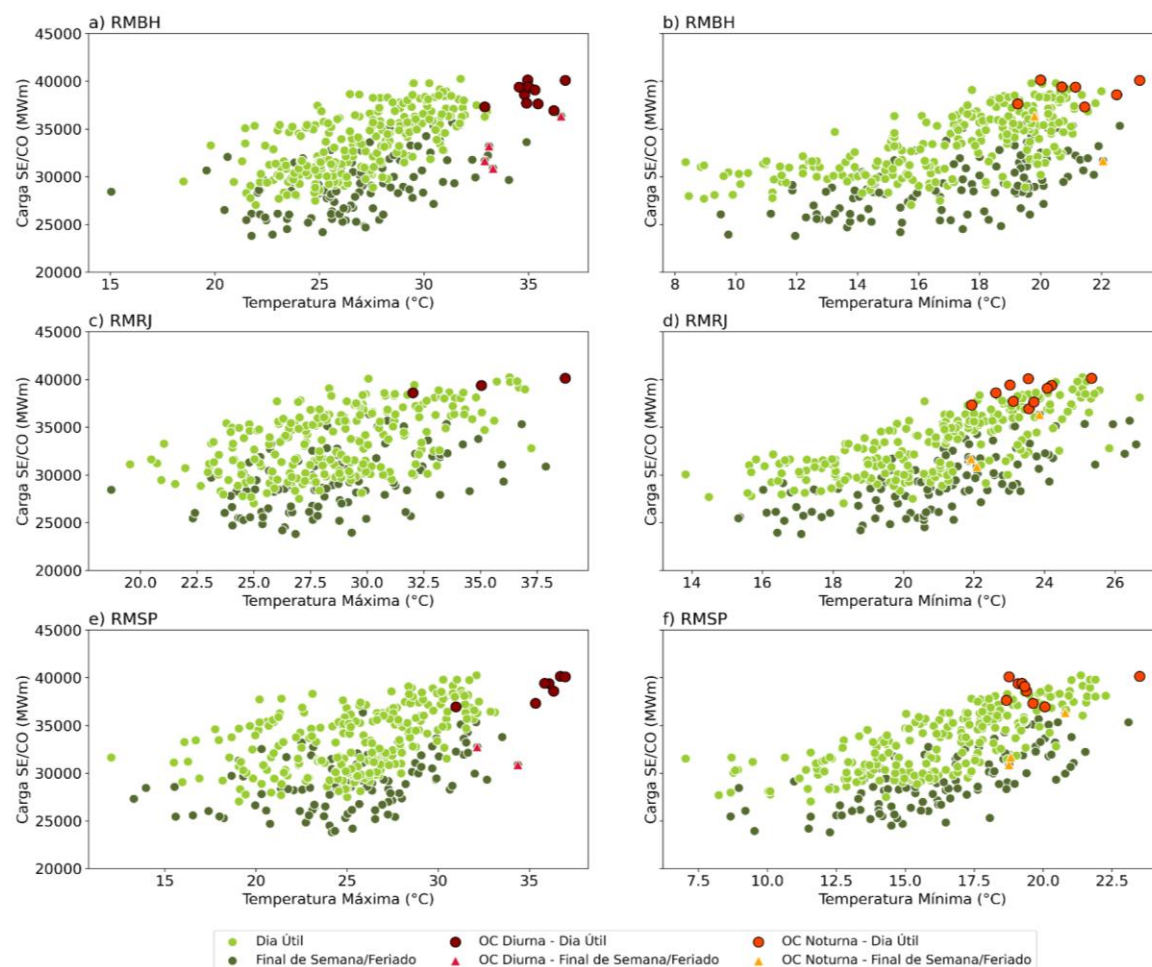


Figura 4.36: Gráfico de dispersão da carga de energia elétrica normalizada do Subsistema SE/CO, considerando Tmax e Tmin de RMBH (letras a e b), RMRJ (letras c e d) e RMSP (letras e e f), destacando os dias úteis, finais de semana e feriados durante o ano de 2020.

Analisando os padrões sinóticos associados a ocorrência ao evento de OC generalizada apresentado nessa seção, a Figura 4.37 exibe os compósitos gerados com base nas variáveis a seguir: Na letra a, estão HGT500, UV500 e T850; Letra b, ROC e ROL; Letra c, UV850 e PREC; letra d, T2M e MSL. Observando os padrões representados nas variáveis HGT500 e T850 (Figura 4.37, letra a), destaca-se a presença de anomalias positivas relativamente fortes de T850 e HG500 sobre boa parte do território brasileiro, além de que a circulação dos ventos na média troposfera (UV500) indicam giros anticiclônicos associados a presença de sistemas de alta pressão. Além disso, essa configuração de anomalias positivas de T850 e HGT500, é observada sobre o Oceano Pacífico Extratropical, porém não há presença de giros anticiclônicos ao conferir o escoamento de UV500. Em contrapartida, áreas sobre a porção Subtropical do Oceano Pacífico Leste, Chile, Argentina e sobre áreas mais Extratropicais do

Oceano Atlântico (entre as latitudes de 30°S e 60°S) sobressaem por apresentar anomalias negativas de T850 e, principalmente, de HGT500, apesar de que o escoamento de UV500 representa giros ciclônicos ou presença de sistemas de baixa pressão somente sobre o Oceano Pacífico Subtropical.

Essa estrutura descrita pode estar relacionada a ocorrência de bloqueio atmosférico em duas hipóteses de configuração: 1) Bloqueio atmosférico do tipo “Ômega invertido”, marcado por uma dois sistemas de alta pressão no nível de 500hPa, conforme indicado pelas anomalias positivas de HGT500 e giro anticiclônico de UV500, (um sobre o Oceano Pacífico Extratropical e outra sobre a faixa central da América do Sul) e entre as alta pressões estão um sistema de baixa pressão, com assinatura de anomalias negativas de HGT500 e circulação ciclônica de UV500; 2) Atuação de duas estruturas de bloqueio atmosférico em simultâneo, sendo que sobre o Oceano Pacífico seria configurado um bloqueio do tipo “Dipolo” (nesse caso um sistema de baixa pressão em latitudes mais baixas – anomalias negativas de HGT500 e circulação horário de UV500 -, ao norte de um sistema de alta pressão - anomalias positivas de HGT500), além da atuação de um sistema de alta pressão anômalo sobre a faixa central da América do Sul (anomalias positivas de HGT500 e circulação anti-horária de UV500) caracterizando um bloqueio “Clássico”. A segunda hipótese é mais provável de ter ocorrido, visto que a disposição das anomalias de HGT500 não indicam uma organização clássica de um bloqueio atmosférico do tipo “Ômega Invertido”. Em paralelo, nota-se que houve atividade de cavados sobre boa parte do interior do Oceano Atlântico Extratropical, sinalizado pelas anomalias negativas de HGT500, porém esses sistemas não conseguem avançar mais ao norte e apresentam deslocamento mais oceânico, devido a essa configuração de bloqueio atmosférico, servindo como uma barreira para a aproximação de outros sistemas durante a ocorrência da OC generalizada em questão.

Sobre os padrões de ROC e ROL à superfície durante o evento de OC generalizada (Figura 4.37, letra b), o sinal de maior destaque é para anomalias negativas de ROL e anomalias positivas de ROC sobre áreas do Nordeste do Brasil, estado de Minas Gerais e Goiás, indicando maior emissão de Radiação de Onda Longa pela superfície, sugerindo que as condições de tempo nessas áreas foi de céu claro, com baixa presença de nebulosidade, o que seria um reflexo natural da presença do sistema de alta pressão anômalo observado em médios níveis. No entanto, fica evidente como a presença de anomalias ligeiramente positivas de ROL sobre o Oceano Atlântico e próximo da costa do sudeste brasileiro, aliadas

a anomalias negativas de ROC, o que sugere alguma presença de nebulosidade especialmente em áreas mais próximas ao litoral, como é o caso de RMRJ e RMSP. Outro padrão interessante ocorre sobre a Argentina e, de forma mais enfraquecido, sobre o Oceano Atlântico Extratropical, onde há presença de anomalias negativas de ROL e de ROC à superfície, sendo um indicativo de presença de nebulosidade, porém homogeneidade de cobertura espacial.

Avaliando os padrões observados de PREC e UV850 (Figura 4.37, letra c), fica evidente as anomalias negativas de PREC sobre boa parte da América do Sul, sugerindo que a massa de ar atuante sobre essa área é relativamente seca, porém sobre pequenas áreas dos estados do Sul do Brasil, e, especialmente, no Oceano Atlântico nota-se a presença de anomalias positivas de PREC. Outros destaques são notados por meio da circulação anti-horária representados no campo de UV850, indicando a presença de sistemas de alta pressão anômalos sobre o Oceano Pacífico e sobre o Brasil, sendo possível amplificação de sinais da Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) e da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). A amplificação desses sistemas e a presença de anomalias negativas de precipitação é resultante do quadro de Bloqueios Atmosféricos comentados anteriormente.

Conferindo os campos de MSL e TSM (Figura 4.37, letra d), o grande destaque fica para as fortes anomalias positivas de T2M atuando sobre boa parte da América do Sul, sobretudo do Brasil, podendo indicar que a OC em análise teve abrangência nacional, com boa parte do país vivenciando o calor extremo. Outro ponto é a presença de anomalias negativas de T2M sobre áreas da Argentina. Do ponto de vista de MSL, há uma resposta de anomalias positivas sobre o Oceano Pacífico, porém sobre o centro-sul do Brasil e no Oceano Atlântico. confere-se anomalias negativas. De modo geral, há indicativos para a atuação de frentes frias oceânicas e com características mais zonais, se deslocando mais ao próximo de latitudes médias, mas com potencial para perturbar o escoamento de sistemas de alta pressão próximos da superfície, provocando ligeira variação de tempo momentânea, porém não é suficiente para romper o padrão de bloqueio atmosférico (vide os padrões em níveis mais altos da troposfera comentados anteriormente) e cessar o aquecimento anômalo sobre boa parte do país.

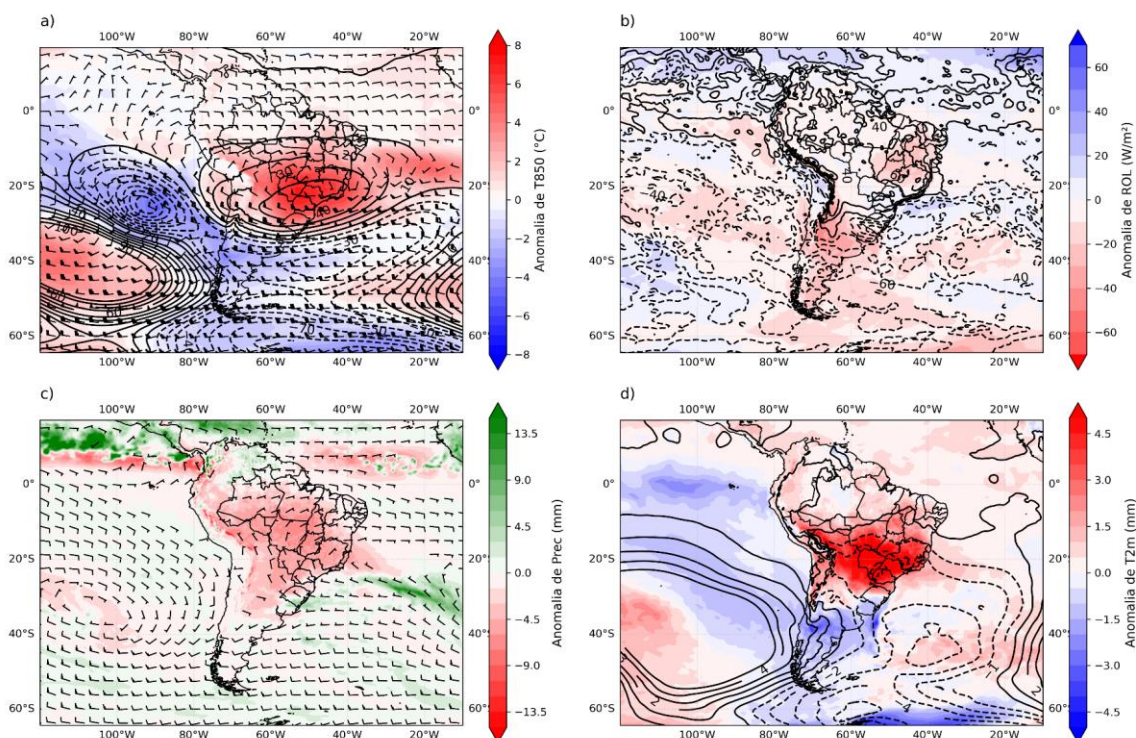


Figura 4.37: Compósitos para o Evento de OC generalizada entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 26 de setembro e 10 de outubro de 2020. Na letra a, estão representadas as variáveis de HGT500 (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas), UV500 (barbelas) e T850 (shadded). Na letra b, estão representadas as variáveis ROC (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas) e ROL (shadded) à superfície. Já na letra c, há indicação das variáveis PREC (shadded) e UV850 (barbelas). E a letra d, representa os campos de T2M (shadded) e MSL (contornos, linhas sólidas indicam anomalias positivas e linhas tracejadas indicam anomalias negativas).

Através da Figura 4.38, é possível visualizar os compósitos dos perfis verticais da troposfera (1000hPa a 200hPa) dos movimentos verticais, representados por  $W$  e de TAR, sendo os perfis verticais são representados em secções zonais (Figura 4.38, letras b e d) e em secções meridionais (Figura 4.38, letras a e c). Conferindo o perfil vertical de  $W$  na troposfera e analisando do ponto de vista meridional (Figura 4.38, letra a), nota-se a que há anomalias positivas de  $W$  sobre uma faixa de latitude nos arredores das Regiões Metropolitanas de interesse (entre 15°S e 22°S – Reg1Lat), indicando movimentos subsidentes anômalos. Em contrapartida, entre 24°S e 30°S (Reg2Lat), percebe-se a presença de movimentos ascendentes anômalos. Ainda sob a perspectiva meridional, porém

analisando o perfil de TAR (Figura 4.38, letra c), é observado o aquecimento anômalo na estrutura vertical da troposfera marcado pelas anomalias positivas de TAR, com certa baroclinia associada, além de que é possível visualizar uma “bolha” de ar anormalmente quente e concentrada entre 700hPa e 1000hPa sobre a faixa de latitude na qual estão inseridas as Regiões Metropolitanas. Analisando os movimentos verticais indicados por W sob o ponto de perspectiva zonal (Figura 4.38, letra b), também é possível perceber movimentos ascendentes em setores da faixa longitudinal de 55°O e próximo de 42.5°O (Reg1Lon) e movimentos subsidentes anômalos mais demarcados na banda de longitude entre 40°O e 27°O (Reg2Lon). Com relação a estrutura vertical de TAR (Figura 4.38, letra d), existe um padrão similar ao que foi comentado pela perspectiva meridional; ou seja, boa parte da coluna vertical da troposfera está aquecida, porém a partir de 700hPa as anomalias positivas de TAR se tornam relativamente mais brandas, também é possível observar uma “bolha” de ar anormalmente aquecido e concentrado entre 700hPa e 1000hPa sobre a faixa de longitude que cobre boa parte do território nacional, notando que o epicentro da onda de calor ocorreu entre as longitudes de 50°O e 55°O.

De um modo geral, os movimentos verticais, seja do ponto de vista zonal ou meridional, dão manutenção ao episódio de calor extremo, visto que onde tem presença de movimentos ascendentes, há presença de ar analogamente quente. Conforme esse ar ascende, há um certo resfriamento, porém não chega a marcar anomalias negativas mais expressivas da temperatura do ar. Esse movimento ascendente segue até o topo da troposfera e inicia o processo de subsidência sobre áreas do território nacional. Ao passo que o movimento subsidente ocorre, ao chegar na superfície, o ar sofre processo de aquecimento por compressão adiabática, reforçando as “bolhas” de ar anormalmente quente que atuaram sobre boa parte do território nacional, inclusive sob as Regiões Metropolitanas de interesse.

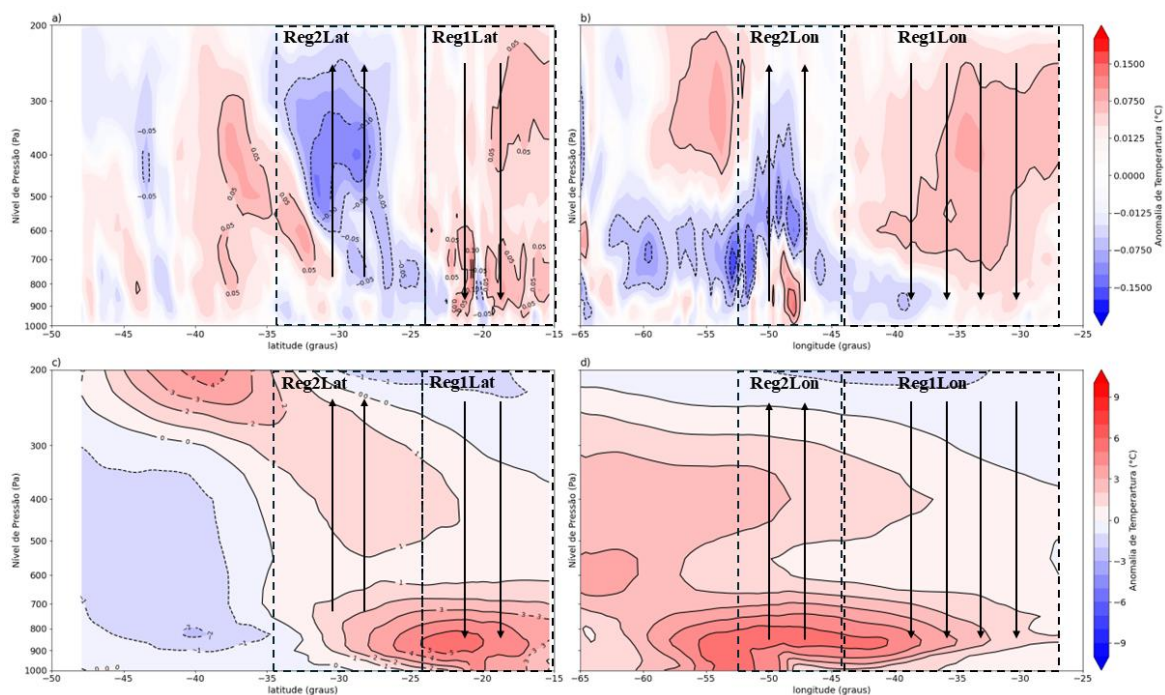


Figura 4.38: Compósitos para os movimentos verticais da troposfera representados por W (letras a e b), além da estrutura vertical de TAR (letras c e d) para o Evento de OC generalizada entre RMBH, RMRJ e RMSP, ocorrido entre 26 de setembro e 10 de outubro de 2020. Nas letras a e c, o perfil vertical da troposfera possui caráter meridional, centrada entre as longitudes de 40°O e 60°O, variando entre as latitudes de 50°S e 15°S. Nas letras b e d, o perfil vertical da troposfera possui caráter zonal, centrada entre as latitudes de 20°S e 26°S, variando entre as longitudes de 65°O e 27°O.

#### 4.8 Discussão dos Resultados: Caracterização dos Eventos Extremos de Temperatura ocorridos em RMBH, RMRJ e RMSP, e suas relações com o El Niño-Oscilação Sul (ENOS)

Os resultados obtidos sobre o total de OC's diurnas e noturnas, entre as Regiões Metropolitanas (Figuras 4.3, 4.9, e 4.15), para cada estação do ano, indicam que para RMBH, esses eventos são mais comuns de ocorrer durante a Primavera (SON) e menor ocorrência durante o Outono (MAM), sendo que os eventos diurnos são mais frequentes em comparação com os eventos noturnos. Já no caso da RMRJ, foi verificado que os casos de OC's diurnas são mais comuns de ocorrer durante a estação do Verão (DJF) e menos comuns durante a Primavera (SON), já os eventos noturnos são mais frequentes na Primavera (SON) e menos comuns no Verão (DJF), sendo que há mais registros de episódios de calor extremo no

período noturno em relação ao período diurno. No caso de RMSP, não há uma sazonalidade muito bem estabelecida, no entanto há menor quantidade de eventos de OC's diurnas durante o Outono (MAM) e menor quantidade de OC's noturnas durante o Verão (DJF), além de que há um certo balanceamento no que diz respeito ao registro total de OC's diurnas e noturnas para essa região.

No que diz respeito ao total de dias com ocorrência de OC's diurnas e noturnas entre as Regiões Metropolitanas, seja no caso de RMBH (Figuras 4.4 e 4.5), RMRJ (Figuras 4.10 e 4.11), ou para RMSP (Figura 4.16 e 4.17), não há padrões claros para aumento do número de dias em período de OCs, assim como não é possível observar aumento ou redução da ocorrência de eventos com maior grau de severidade ao longo dos anos dentro do período analisado. Nesse sentido, os eventos de OC's ocorridos dentro do período analisado, podem exibir maior dependência de configurações conjunturais, como a combinação de efeitos de modos de variabilidade climática (por exemplo, ENOS e o Dipolo do Atlântico Sul), oscilações intrasazonais (Oscilação de Madden-Julian e Modo Anular Sul – Oscilação Antártica) e mecanismos de maior frequência (como trens de onda de Rossby estacionados, Bloqueios atmosféricos, dentre outros).

No que diz respeito aos Eventos de Calor Extremo considerando o contexto das mudanças climáticas, há estudos em escala global indicando o aumento da frequência, duração e intensidade (BALDWIN et al., 2019b; KIARSI et al., 2023; PERKINS; ALEXANDER; NAIRN, 2012), assim como para a América do Sul e o Brasil (BITENCOURT et al., 2016, 2020; CECCHERINI et al., 2016; FERON et al., 2019; GEIRINHAS et al., 2018a, 2018e; RUSTICUCCI, 2012; SILVA et al., 2024). No entanto, poucos estudos fornecem uma descrição mais detalhada no que diz respeito a climatologia de OC's para as Regiões Metropolitanas abordadas neste estudo.

Comparando os resultados do presente trabalho com os resultados obtidos por GEIRINHAS et al., (2018b), que avaliou áreas que estão inseridas em RMRJ e RMSP. Para áreas do contexto da RMRJ, o estudo de referência aponta que a maior atividade de OC's diurnas ocorre no Inverno (JJA) e menor durante a Primavera (SON), já os resultados deste trabalho detectaram mais casos no Verão (DJF) e menos ocorrência durante a Primavera (SON), havendo discordâncias em relação a pico de ocorrência de eventos diurnos entre as estações do ano, porém há concordância em relação a menor ocorrência de OC's diurnas

durante a Primavera (SON). Já para o caso das OC's noturnas, os resultados são diferentes do que foi observado na subseção 4.2.2 deste Capítulo. De acordo com o referencial teórico, há mais casos de OC's noturnas durante o Outono (MAM) e menos registros na Primavera (SON), sendo que neste estudo a maior quantidade de casos de OC's noturnas foi verificada na Primavera (SON) e mínima no Verão (DJF).

No que diz respeito a RMSP, GEIRINHAS et al., (2018b), encontrou que os eventos de OC's (diurnas e noturnas) são mais ativas no período do Verão (DJF) e menos casos de OC's diurnas ocorrem no Outono (MAM) e durante a Primavera (SON) para OC's noturnas. De forma geral, o único ponto de concordância entre os resultados obtidos para o presente estudo e os resultados de GEIRINHAS et al., (2018b) consiste na mínima atividade de OC's diurnas durante a OC's diurnas no Outono (MAM).

De modo geral, os resultados de RMSP e RMRJ do presente estudo estão em desacordo com a referência comentada previamente e para isso há uma série de hipóteses que podem explicar essas diferenças, como: período de dados adotado no presente estudo (jan/1980 a fev/2022), incluindo anos mais recente que talvez podem introduzir efeitos de temperaturas mais elevadas (ALLEN et al., 2018; BLUNDEN et al., 2019; IPCC, 2023; LINDSEY, REBECCA; DAHLMAN, 2019; REGOTO et al., 2021); número de estações meteorológicas utilizadas para representar cada região metropolitana do estudo; aspectos locais e regionais como a topografia (RICARDI, 2020; TAVARES; FERREIRA, 2020) que podem alterar o escoamento em baixos níveis ou acentuar efeitos de advecção de calor; fatores antropogênicos como a urbanização que pode gerar fenômenos de ilhas de calor urbano (ICU's) (MIRANDA, 2015; PERES et al., 2018; SENA; FRANÇA; PERES, 2014; UMEZAKI et al., 2020); e, por fim, os efeitos de maritimidade (caso de RMRJ), que pode atuar como "regulador térmico" devido a maior disponibilidade de umidade, e continentalidade (especialmente para RMBH e RMSP) que pode colaborar para a elevação das temperaturas em dias com condições de céu claro, permitindo maior interação da radiação solar com a superfície.

Sobre o total de dias em OC's por ano com ocorrência de Eventos Extremos de Calor, há estudos que abordam essa temática para a América do Sul e áreas do Brasil (DOS REIS; BOIASKI; FERRAZ, 2019; FERON et al., 2019; GEIRINHAS et al., 2018a; MARENGO et al., 2025), até mesmo sobre os eventos compostos de Calor Extremo e Secas

(GEIRINHAS et al., 2021). Em contexto geral, o estudo produzido por REIS, BOIASKI & FERRAZ (2019), indica que não é possível concluir que há aumento do número de casos de OC's em áreas que abrangem RMBH, RMRJ e RMSP, ao longo de 1980 a 2013, porém há aumento da quantidade de casos de maior intensidade. Já os resultados de (CECCHERINI et al., 2016), apontam que estações meteorológicas, localizadas nas Regiões Metropolitanas de interesse, apresentam aumento da magnitude/intensidade de OC's e aumento do número de casos ao longo de 1980 e 2014. Além disso, MIRANDA et al. (2024) indica que para Belo Horizonte e Rio de Janeiro e São Paulo, há aumento de exposição ao calor extremo ao longo de 1979 e 2021. Similar a estes resultados, (DOS SANTOS, D. M. *et al.*, 2024) indica que, além do aumento do número de OC's ao longo de 1970 e 2020, há maior participação de casos severos de OC's nos anos mais recentes do histórico para Belo Horizonte e Rio de Janeiro e São Paulo. De forma geral, os resultados de referências variam de acordo com o método utilizado para a detecção e caracterização de OC's, porém há uma certa concordância de que os Eventos de Calor Extremo estão se tornando, ao menos, mais intensos em comparação com o passado.

Adotando o estudo de GEIRINHAS et al., (2018b) como principal referência, para áreas que compreendem RMRJ, os resultados do presente estudo e os padrões representados no estudo de referência estão em acordo no sentido de que não é possível observar se, ao longo dos anos, há aumento do total de dias em OC's diurnas e/ou OC's noturnas, sendo que o estudo de referência não encontrou tendências expressivas para o aumento de dias em OC's por ano nesta região. No caso de RMSP, há divergência de resultados: por meio dos resultados do referencial teórico em questão, nota-se que há aumento do número de dias em OC's diurnas e noturnas, inclusive com tendências positivas para o aumento de dias em OC's por ano sendo verificadas para áreas inseridas em RMSP; já no caso deste trabalho, não é possível observar se há aumento ou não do número total de dias em OC's diurnas ou noturnas por ano ao longo de jan/1980 e fev/2022. Por fim, para RMBH, existem estudos avaliando a ocorrência de OC's (OLIVEIRA, 2019), porém é inviável a comparação climatológica, já que não há referências que comentem esse aspecto das OC's nesta região.

Sobre padrões sazonais relacionados à ocorrência de OF's diurnas e noturnas para cada Região Metropolitana (Figuras 4.6, 4.12, e 4.18), há melhor padronização dos eventos diurnos em comparação com os eventos noturnos. Sob a perspectiva de RMBH, os eventos de OF's diurnos e noturnos são mais frequentes durante o Outono (MAM) e analisando o

registro total de cada tipo de evento por período do dia, verificou-se que as OF's noturnas possuem maior frequência em relação as OF's diurnas. No caso de RMRJ e RSMP, os eventos de OF's diurnas ocorrem com maior frequência na estação do Verão (DJF), porém para os episódios de OF's noturnas, não há uma sazonalidade bem estabelecida, sendo que, de uma forma geral, os eventos noturnos são mais frequentes em comparação aos eventos diurnos.

Com base nos resultados deste estudo, é possível verificar que apenas RMRJ apresenta redução gradual do número de dias por ano com ocorrência de OF's diurnas (Figura 4.13) ao longo de jan/1980 e fev/2022, já para as regiões RMBH e RMSP (Figuras 4.7 e 4.19, respectivamente) não é viável observar aumento ou redução do número de dias por ano. Com relação aos eventos de OF's noturnas, RMSP (Figura 4.20) indica ligeira redução do número de dias por ano ao longo do período analisado, porém para RMBH e RMRJ (Figuras 4.8 e 4.14, respectivamente) não é verificado redução ou aumento do número de dias em OF's noturnas por ano.

Em linhas gerais, apenas os resultados do número de dias com OF's diurnas por ano de RMRJ e do número de dias com OF's noturnas por ano de RMSP estão de acordo com referências que abordam aspectos similares e indicam redução da magnitude e número de ocorrência de OF's ao longo dos anos (CECCHERINI et al., 2016; RUSTICUCCI, 2012) e em linha com estudos que indicam redução de extremos de temperaturas baixas para o Brasil (REGOTO et al., 2021). No entanto, quanto a sazonalidade dos eventos de OF's registrados nas Regiões Metropolitanas, não foi possível a comparação de resultados em relação às referências, já que não há muitos estudos que analisem a ocorrência por estações do ano para o Brasil.

No que diz respeito ao comportamento de Tmax e Tmin de cada Região Metropolitana, relacionado e discretizando pela ocorrência dos Eventos Extremos de Calor ou de Frio (OC's e OF's) e por fases do ENOS, foi apresentado neste estudo os resultados relativos ao período de Verão (DJF). Em linhas gerais, os resultados demonstram que eventos de OC's representam valores mais elevados de Tmax e Tmin, independente da fase os ENOS (La Niña, Neutralidade ou El Niño). Assim como os eventos de OF's sinalizam valores mais reduzidos, também independe da fase os ENOS; ou seja, o modo de variabilidade ENOS por si só não serve como balizador para indicar que durante casos de El Niño (La Niña), é

possível maior (menor) frequência de OC's e/ou OC's de intensidade mais (menos) significativa. Já para casos de La Niña (El Niño), é possível maior (menor) frequência de OF's e/ou OF's de intensidade mais (menos) significativa. Sob outro ponto de perspectiva, esses resultados sugerem que o modo de variabilidade ENOS não é um fenômeno que, por si só, introduza algum sinal de temperaturas mais elevadas ou mais baixas para áreas inseridas na Região Sudeste do Brasil, diferentemente do que é encontrado para áreas do Sul e Norte/Nordeste do país (ALEXANDER; UOTILA; NICHOLLS, 2009; BARROS; GRIMM; DOYLE, 2002; LIN; QIAN, 2019). Em contrapartida, existem estudos que indicam que durante episódios de El Niño na Primavera (SON), há reposta de elevação das Temperaturas em áreas do sudeste brasileiro, porém o sinal é fraco em comparação com que é observado para as Regiões Norte e Nordeste do Brasil (CAI et al., 2020).

Em um contexto global, existem evidências de períodos de El Niño se relacionam o aumento da frequência, duração média, magnitude e maior área de atuação, de eventos de OC's na faixa de latitude entre 0° e 30°S do Hemisfério Sul. No entanto para o Brasil, especificamente em áreas em que estão inseridas as Regiões Metropolitanas consideradas no presente estudo, não há diferenciação relevante na quantidade de casos de OC's entre as fases do ENOS (La Niña, Neutralidade ou El Niño) e sem muitas variações na duração dos casos, quantidade de eventos e até mesmo na intensidade (DOS REIS; BOIASKI; FERRAZ, 2019).

Em resumo, o modo de variabilidade ENOS pode ser entendido como um dos fatores conjunturais dentro de um quadro geral que compõem casos de eventos extremos para áreas do Brasil, inclusive as Regiões Metropolitanas abordadas nesse estudo, porém não é possível afirmar que esse modo de variabilidade pode gerar um quadro estrutural favorável a ocorrência dos mesmos eventos.

#### **4.9 Discussão dos Resultados: Relações entre a Tmax e Tmin das Regiões Metropolitanas e a Carga Normalizada de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO**

De maneira geral, para todas as regiões metropolitanas, é possível conferir que as variáveis possuem relações distintas entre os dois períodos de 2003 a 2010 e de 2011 a 2021. Em aspectos gerais, as correlações possuem significância estatística com nível de confiança

de 95%, com exceção para o ano de 2008 usando os valores de T<sub>min</sub> de RMBH e RMRJ. Para o primeiro período (2003 a 2010), a correlação entre T<sub>min</sub> das Regiões Metropolitanas e a carga normalizada do SE/CO é mais fraca, com valores médios de r de 0,34 para RMBH, 0,29 para RMRJ e 0,30 para RMSP (média de r de 0,31). Já para os resultados da correlação usando a variável T<sub>max</sub> no lugar de T<sub>min</sub>, os valores são similares aos comentados anterior, com valor médio de r de 0,28 para RMBH, 0,32 para RMRJ e RMSP (média de r de 0,30). Para o segundo período (2011 a 2021), as correlações aumentaram em relação ao período anterior. A correlação, valor médio de r nesse período, entre T<sub>min</sub> de cada Região Metropolitana e a carga normalizada do SE/CO indicam valores de 0,46 para RMBH e RMRJ e 0,43 para RMSP (com valor médio de r de 0,45 entre as regiões em questão). Para as correlações envolvendo T<sub>max</sub>, os valores médios de r no período são de 0,48 para RMBH, 0,55 para RMRJ e RMSP (com média de r de 0,52 entre as regiões de destaque).

Em resumo, a influência da Temperatura do Ar (T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub>) de cada Região Metropolitana aumenta consideravelmente ao conferir o comportamento entre o primeiro e segundo período analisados, aumentando, em média, as relações com T<sub>min</sub> em cerca de 66% e as relações de T<sub>max</sub> aumentaram em 60%. É possível que este comportamento esteja associado a popularização e utilização de aparelhos de ar-condicionado, sobretudo a partir de 2010 (BEZERRA *et al.*, 2021, 2022b).

Para este resultado, é importante comentar aspectos fundamentais a respeito da carga de energia elétrica. Sendo assim, fatores ligados a macroeconomia são essenciais para explicar a expansão da carga de energia elétrica no Brasil e, conseqüentemente, no Subsistema SE/CO. Inicialmente, o contexto econômico vivido no Brasil entre 2000 e 2010 era de crescimento do PIB (BARBOSA, 2019; BOMFIM *et al.*, 2011b; FEIX VAZ; FARRET, 2020). Mais especificamente, os valores de IPCA acumulados anuais caíram gradualmente de 9,3% para 5,91%, assim como a taxa de câmbio USD/BRL variando 2,88 a 1,66, queda do desemprego de 12,3% para 6,8%, aumento do salário-mínimo de R\$240,00 em 2000 para R\$ 510,00 em 2010 e queda da taxa de juros básica de 16,32% em 2000 para 10,66% em 2010 (SANTOS; FONSECA, 2022). Além disso, há outros aspectos importantes a serem observados como o desenvolvimento e crescimento de programas sociais de transferência de renda condicionada como o Bolsa Família (HOFFMANN, 2013), atendendo a populações mais carentes e pobres do território nacional. Durante esse período, é importante considerar o aumento de 90% de acesso ao crédito por pessoas físicas, sendo que

esse fator impulsionou o consumo brasileiro (SCHETTINI et al., 2012). Dessa maneira, houve expansão do poder de compra da população brasileira, refletindo no aumento do consumo de energia elétrica (MAÇAIRA et al., 2020), assim como aquisição de bens domésticos como aparelhos de ar-condicionado (NOGUEIRA, 2013). Ou seja, a partir do ano de 2010, a população dispunha de mais aparelhos de ar-condicionado para lidar com o calor, sendo um dos fatores para o aumento do consumo de energia elétrica no país.

Outro aspecto importante a ser considerado, é a influência de variáveis meteorológicas sobre comportamento do consumo de energia elétrica. Nesse sentido, o aumento da temperatura média do ar ao longo dos últimos anos ajuda a explicar o aumento do consumo de energia elétrica (BIARDEAU et al., 2020). Nesse sentido, é importante ressaltar que no caso do Brasil é possível observar tendências históricas da elevação das temperaturas, assim como para valores extremos dessa variável (DE SOUZA et al., 2025; REGOTO et al., 2021), além de que as projeções indicam que os valores médios de temperatura para o Brasil devem seguir aumentando em virtude das mudanças climáticas (IPCC, 2023). Dessa forma, ao longo dos próximos anos, é esperado que o impacto da temperatura do ar se torne ainda mais marcante no consumo de energia elétrica (BEZERRA et al., 2021) e, conseqüentemente, na carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO.

Em seguida, foram apresentados os resultados relativos aos gráficos de dispersão elaborados usando Tmax e Tmin de cada Região Metropolitana, confrontando com a carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO (Figuras 4.26, 4.27 e 4.28). Em linhas gerais, o primeiro ponto a ser notado é que, em praticamente todos os casos, o gráfico indica uma forma similar a cauda direita de um padrão “U-Shape”, porém com inclinação mais suave. Por esse ponto de vista, os resultados são diferentes em relação a padrões encontrados em estudos para a Itália (APADULA et al., 2012), Jordânia (ALMUHTADY et al., 2019), Argélia (CHABOUNI; BELARBI; BENHASSINE, 2020), Espanha (GARRIDO-PEREZ et al., 2021), região do Mediterrâneo (BECCALI et al., 2008), áreas da Argentina como a Cidade de Buenos Aires (SANTÁGATA et al., 2017), porém para áreas mais ao Noroeste da Argentina, o comportamento é similar ao observado neste presente estudo (PROPATO et al., 2021). Boa parte dos estudos citados anteriormente, representam as relações de consumo ou carga de energia elétrica e métricas de temperatura do ar com um formato mais bem definido como “U-Shape”, próximo a forma de uma equação matemática de segundo grau.

No entanto, há certos aspectos que devem ser considerados e que explicam essas diferenças. O primeiro fator é que o clima das áreas em análise no presente estudo é diferente do clima das regiões comentadas anteriormente: para as áreas em análise no presente estudo, temos um clima mais próximo do tropical úmido, com temperaturas amenas no inverno e mais elevadas durante o verão. Já para as áreas em comparação, especialmente para a Itália e Buenos Aires (Argentina), o período do verão é relativamente mais quente em comparação com outras estações do ano, já o inverno é razoavelmente mais frio ao confrontar com o mesmo período para regiões de clima mais próximo ao tropical. Além disso, a maior parte dos estudos investigam as relações entre cidades, distritos, estados; ou seja, são elaborados em aspectos mais específicos. Neste trabalho, as relações foram obtidas por meio de apenas três Regiões Metropolitanas inseridas no Subsistema SE/CO, representando uma limitação, já que não representa a realidade de uma área tão grande, com alta diversidade de particularidades e comportamento de consumo que pode ser distinto entre diferentes setores deste subsistema.

De forma complementar, aparentemente, os valores de Tmax entre 25 e 30°C e valores de Tmin entre 15 e 20°C em RMBH, pode indicar intervalos de temperatura em que não há grandes variações da carga normalizada de energia elétrica do Subsistema SE/CO. Para RMRJ, os valores de Tmax ficam entre 27,5°C e 35°C e valores de Tmin na faixa de 19 a 23°C. Já do ponto de vista de RMSP, os valores Tmax entre 25 e 30°C e por Tmin dentro do intervalo de 15 a 17,5°C também sugerem um intervalo de pouca variação da carga normalizada do Subsistema SE/CO.

Nesse sentido, foi observado que Tmax igual ou superior a 30°C para RMBH e RMSP, e 35°C para RMRJ, estiveram relacionados com valores mais elevados da carga normalizada do SE/CO. Ao considerar Tmin, foi conferido que valores iguais ou superiores de 20°C para RMBH, 23°C para RMRJ e 17,5°C para RMSP, também podem provocar elevações da Carga Normalizada do SE/CO. De modo geral, vale ressaltar que episódios de OC's severas e extremas (diurnas e noturnas) estiveram associados a valores superiores aos valores de Tmax e Tmin comentados anteriormente. Adicionalmente, foi verificado que valores de Tmax igual ou inferior a 25°C para RMBH e RMSP, e 27,5°C para RMRJ, são capazes de provocar desvios negativos na Carga Normalizada do SE/CO. No que diz respeito aos resultados verificados utilizados Tmin, nota-se que valores iguais ou inferiores a 15°C para

RMBH e RMSP, e 19°C para RMRJ, também possuem potencial para reduções mais significativas da Carga Normalizada do SE/CO.

#### **4.10 Discussão dos Resultados: Estudos de Caso – Impactos dos eventos de OC e OF sobre a Carga Normalizada de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO e Padrões Sinóticos associados**

Nas seções 4.8 e 4.9, foram analisados um caso de OC (mesclada com registro diurnos e noturnos) e um caso de OF (ocorreu de forma majoritariamente noturna) que provocaram variações expressivas da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante o ano de 2020. O primeiro caso apresentado diz respeito a OF generalizada entre as Regiões Metropolitanas, ocorrido entre 05 e 12 de maio de 2020, houve uma variação de -1.665MW médios abaixo do percentil 10 (cerca de 5,5% abaixo deste limiar), em termos de potência -319.680MWh, sendo o limiar de referência para a carga normalizada do SE/CO nesta ocasião. Já o segundo caso foi o Evento Extremo de Calor ocorrido entre 26 de setembro e 10 de outubro de 2020, período que foi verificado um desvio positivo de +2.343MW médios, ou em termos de potência +843.480MWh, acima do limiar baseado no percentil 90 diário (cerca de 6.1% acima deste limiar) da carga normalizada do SE/CO.

Em seguida, foram apresentados os resultados relativos aos compósitos de variáveis meteorológicas a fim de traçar os padrões associados a esses Eventos de Temperatura Extrema.

Com relação ao episódio ao evento de OF generalizada ocorrido em maio de 2020, a Figura 4.39 sintetiza os principais aspectos sinóticos relacionados a esse evento. Nesse caso, foi verificado que a passagem de uma frente fria com possível deslocamento mais oceânico, associada a um cavado, relativamente, discreto em médios níveis da troposfera entre o sudeste e nordeste brasileiro, demarcado pelo escoamento de UV50. A passagem desse sistema esteve relacionada ao deslocamento de uma massa de ar anormalmente frio, produzindo anomalias negativas de T850 e T2M, sendo que essa massa de ar frio esteve associada a sistemas de alta pressão migratórios que se deslocam na retaguarda de frentes frias ou sistemas frontais, indicando anomalias positivas de MSL sobre áreas que afetam as Regiões Metropolitanas, além de que o escoamento de UV850 reforçam a presença de giro anticiclônico. De certa forma, os ventos associados a alta pressão migratória demarcada

em 850hPa pode ter reforçado o transporte ou advecção de ar anormalmente frio que estava sobre o Oceano Atlântico (conforme verificado por T850) para áreas que abrangem as Regiões Metropolitanas analisadas, refletindo no campo de T2M, sendo um mecanismo de suporte para as temperaturas mais baixas próximo da superfície.

Adicionalmente, pelo campo de PREC há presença de anomalias ligeiramente negativas próximo das regiões de interesse, sugerindo que a massa de ar anormalmente frio, associada características de sistemas de alta pressão migratórios, porém sem nenhum sinal de maior expressão. Por fim, a presença de anomalias positivas de ROL e negativas de ROC à superfície indicam que as condições de tempo de céu claro e pouca nebulosidade sobre as regiões de interesse, corroborando com um cenário tipicamente causado pela presença de sistemas de alta pressão (nesse caso associados a passagem da frente fria).

Aliado a essa conjuntura, os resultados dos perfis verticais, sugerem que, tanto pela perspectiva zonal ou meridional (Figura 4.33), o ar anormalmente frio (anomalias negativas de TAR) combinado com movimentos descendentes (anomalias positivas de W) em basicamente toda a coluna da troposfera, indicam que houve advecção do ar anormalmente frio com direção de alto para baixos níveis da troposfera, influenciando áreas do sudeste brasileiro, sobretudo as Regiões Metropolitanas em evidência. Aliado a conjuntura comentada antes, esse tipo de mecanismo reforça a ocorrência da OF generalizada estudada.

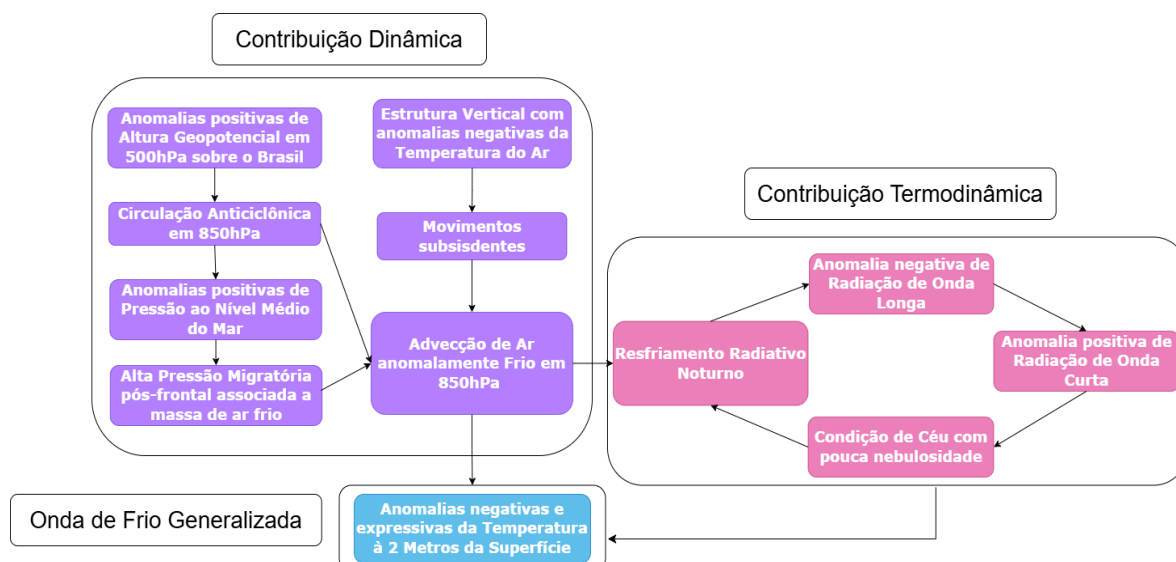


Figura 4.39: Síntese dos principais aspectos relacionados a ocorrência da OF de maio de 2020.

Em um aspecto geral, os Eventos de Frio Extremo sobre a América do Sul, estão associados a passagem de cavados em altos e médios níveis, relacionados a transientes baroclínicos (geralmente associado a um trem de Onda de Rossby), refletindo em anomalias negativas da pressão ao nível médio do mar relacionadas a atuação de um sistema de alta pressão migratório pós-frontal, com circulações anticiclônicas do vento em baixos níveis e anomalias negativa de ROL à superfície (indicando condições de céu claro ou com pouca nebulosidade), reforçando o transporte/advecção de ar anormalmente frio para áreas da América do Sul (COLLAZO; BARRUCAND; RUSTICUCCI, 2019; LANFREDI; DE CAMARGO, 2018; MÜLLER; BERRI, 2007; OLMO; BETTOLLI; RUSTICUCCI, 2020; PEZZA; AMBRIZZI, 2005; SULCA et al., 2018).

Além disso, há estudos de casos pontuais que reforçam os padrões encontrados anteriormente, como o que foi elaborado por (MARENGO et al., 2023) sobre caso da OF ocorrida durante o Inverno (JJA) de 2021 que afetou boa parte da parte central da América do Sul, em que foi verificado que a passagem de uma frente fria pelo oceano associada a um ciclone extratropical próximo da costa do sul/sudeste brasileiro, deslocamento de cavados em médios níveis da troposfera, assim como o deslocamento de um sistema de alta pressão migratório pós-frontal mais posicionado ao oceano (similar ao caso apresentado neste estudo) que favoreceu a advecção de ar frio em latitudes mais baixas que compõem a faixa central da América do Sul.

Dessa forma, os resultados apresentados no presente estudo, estão em acordo com as referências citadas anteriormente, indicando padrões sinóticos que podem ser usados como modelos conceituais para a observação e mapeamento de outros casos de frio extremo. Por fim, dentro do contexto da elevação das temperaturas devido ao aquecimento global (IPCC, 2023) e diante de tendências obtidas por dados observados indicando menor frequência extremos de temperaturas baixas para áreas do Brasil (REGOTO et al., 2021), deve-se levar em conta que a passagem de frentes frias ocorre em todas as estações do ano (BERRY; REEDER; JAKOB, 2011), sendo mecanismo fundamental para a ocorrência de Eventos de Frio Extremo. Nesse sentido, é provável que esse tipo de evento extremo ocorra com menor frequência ao longo dos próximos anos.

Sobre o caso da OC generalizada ocorrida entre setembro e outubro de 2020, a Figura 4.40 esquematiza os principais fatores atuantes diante desse caso. Do ponto de vista dinâmico, esse evento esteve associado a ocorrência de um bloqueio atmosférico do tipo “Dipolo” sobre o Oceano Pacífico (demarcado nos campos de HGT500 e UV500), e um dos efeitos desse tipo de configuração é dificultar o escoamento zonal da atmosfera no Hemisfério Sul, provocando deslocamento de frentes frias mais ao Sul e dificuldade de que esses sistemas frontais se desenvolvam para latitudes mais baixas. Além disso, outra estrutura de bloqueio atmosférico, do tipo “Clássico” (sistema de alta pressão anômalo representado nos campos de HGT500 e UV500), esteve ativo durante esse período e posicionado sobre boa parte do território nacional, atuando como uma barreira e reforçando a dificuldade com que sistemas frontais, ou cavados, ou frentes frias, pudessem atuar sobre as áreas de interesse.

Sendo dada as condições dinâmicas de escoamento travado, as condições de tempo são de céu predominante claro, com pouca nebulosidade sobre boa parte do Brasil, conforme indicado pelo padrão das variáveis ROC e ROL à superfície, gerando condições para elevações acentuadas das temperaturas conforme sinalizado no nível de 850hPa (T850) e próximo da superfície (T2M) devido a maior interação com a radiação solar.

Outro reflexo interessante a ser notado é o padrão de médios níveis, no nível de 850hPa, a circulação dos ventos UV850 responde aos sinais de bloqueios atmosféricos verificando em médios níveis da troposfera, sinalizando a presença de sistemas de alta pressão anômalos em baixos níveis, ocorrendo sobre o Oceano Pacífico, sendo um possível

sinal de amplificação do sistema ASPS, e outro sobre o Brasil, indicativo da ASAS mais ativa. Além disso, o giro anti-horário de UV850 por áreas mais interioranas do Brasil gera outro efeito, atuando na advecção de ar anormalmente quente e seco (conferido pela precipitação abaixo da média no período) para áreas onde estão inseridas as Regiões Metropolitanas de interesse, reforçando condições para manutenção e/ou ocorrência do fenômeno de OC generalizada.

Dentro de todo esse contexto sinótico envolvido na ocorrência do evento de OC generalizada, há certos aspectos interessantes a serem comentados. Nesse caso, anomalias negativas de MSL sobre áreas onde teve registro da OC generalizada chamam atenção, por ser um padrão diferente do esperado. Nesse ponto, há indicativo da atuação de frentes frias oceânicas, com deslocamento mais zonal, e relacionadas a área de atuação de cavados ligadas a anomalias negativas da altura geopotencial em médios níveis da troposfera, posicionadas mais sobre o Oceano Atlântico Subtropical/Extratropical. A passagem dessas frentes frias se reflete de forma bem discreta nos campos de ROC e ROL à superfície, que indicam alguma presença de nebulosidade nesse período, e no campo de PREC, sinalizando precipitação acima da média em pontos do interior do Oceano Atlântico. O efeito da passagem dessas frentes frias também pode ser observado no comportamento de Tmax de RMRJ e RMSP (Figura 4.34, letras e c), regiões mais próximas ao litoral, sendo perceptível reduções discretas e pontuais de Tmax entre casos de OC's locais, especialmente em RMSP (sendo o que possivelmente impediu RMSP de apresentar um único evento duradouro de OC diurna e fez com que, ao invés disso, ocorrem eventos intercalados de OC's diurnas – conforme Tabela 4.2).

Adicionalmente, os movimentos verticais podem ter atuado como outro mecanismo de manutenção da OC generalizada (Figura 4.38), com possibilidade de ocorrência do processo de compressão adiabática conforme os movimentos subsidentes chegavam próximo da superfície. Do ponto de vista meridional, os movimentos ascendentes anômalos em Reg1Lat e subsidentes em Reg2Lat por toda coluna atmosférica, sendo que no meio entre estas duas regiões estaria uma área de transição de anomalias negativas para anomalias positivas de HGT500 (possível transição da borda leste de cavados e borda oeste do sistema de alta pressão), região preferencial para forçar movimentos verticais ascendentes na troposfera. Além disso, o mesmo tipo de padrão foi observado do ponto de vista zonal, porém as interações dos movimentos ascendentes de Reg1Lon e subsidentes em Reg2Lon ocorrem

em uma banda longitudinal em que há a presença de sistemas de alta pressão na média troposfera, corroborando com os comentários anteriores e reforçando condições para prosseguimento do Evento de Calor Extremo.

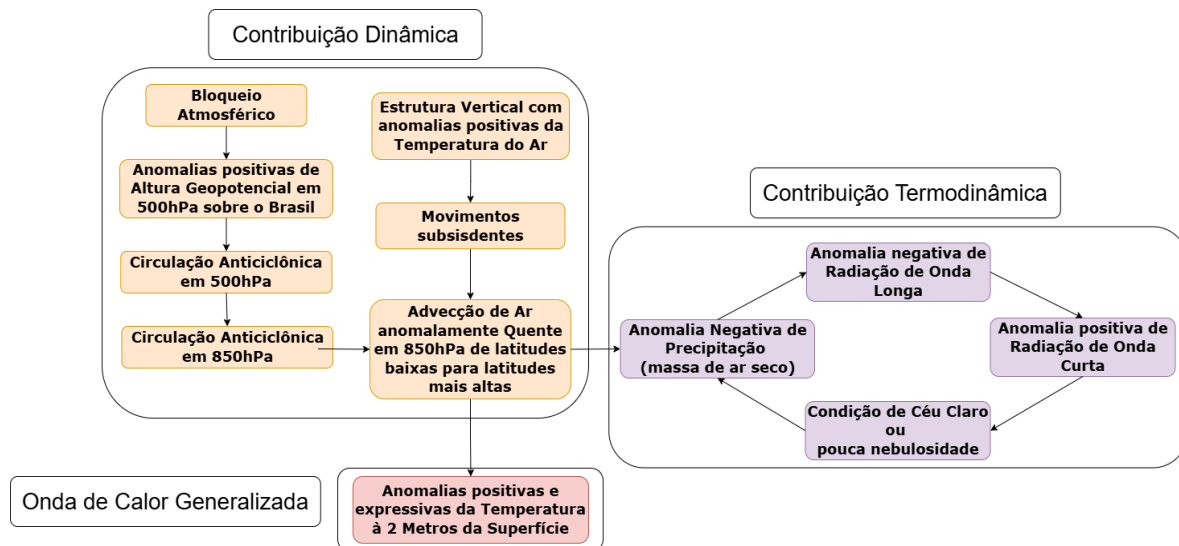


Figura 4.40: síntese dos principais aspectos relacionados à ocorrência da OC de setembro/outubro de 2020.

Nesse sentido, há estudos elaborados para traçar perfis climáticos em relação a ocorrência de OC's no Brasil, bem como os padrões sinóticos associados (GEIRINHAS et al., 2018a, 2019, 2020, 2021; GEIRINHAS, 2016; SULI et al., 2023). Em geral, esses Eventos de Calor Extremo estão associados a presença persistente de sistemas de alta pressão em médios e altos níveis da troposfera, normalmente associados a atuação de bloqueios atmosféricos, impedindo que ondas frontais avancem sobre a área afetada. Em consequência desse padrão em níveis mais altos da troposfera, em baixos níveis há amplificação do sinal de sistemas de alta pressão, com anomalias positivas da pressão ao nível médio do mar e giros anticiclônicos, associados a uma massa de ar seca e anormalmente quente, marcadas pela precipitação abaixo da média e com condições de céu claro ou pouca nebulosidade (anomalias positivas da radiação de onda longa e negativas da radiação de onda curta à superfície). Além disso, os giros anticiclônicos em baixos níveis por vezes auxilia na advecção de ar quente e seco de outras regiões para as áreas sob influência da OC, gerando um mecanismo de manutenção do fenômeno e respondendo com temperaturas anormalmente elevadas.

Alguns estudos são direcionados para casos específicos, como o caso da OC de fevereiro de 2010 registrada na RMRJ (GEIRINHAS et al., 2019). Para este caso, todos aspectos sinóticos comentados anteriormente se fizeram presentes durante este evento: ocorrência de um bloqueio do tipo “Dipolo”, presença de sistemas de alta pressão em altos, médios e baixos níveis da troposfera, presença de ar anormalmente seco e quente, condições de céu claro, advecção de ar quente para a região afetada, dentre outros. Porém um aspecto a ser observado é que no caso em questão, a coluna vertical da troposfera sob a região afetada estava com anomalias positivas da temperatura do ar, de maneira muito similar ao que foi encontrado no presente estudo.

Outro caso é a OC de dezembro de 2013, ocorrida em boa parte do centro-sul da América do Sul e chegando a afetar áreas do Brasil (ALVAREZ et al., 2019) e que também foi verificado a presença de sistemas meteorológicos associados ao Calor Extremo, similares aos que já foram comentados, porém nesse caso foi verificado influência de fatores intrasazonais relacionados a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), indicando que a fase 3 naquela ocasião ligada a convecção anômala no Oceano Índico gerou condições para o estabelecimento de um sistema de alta pressão sobre áreas da América do Sul. Esse tipo de abordagem endossa os comentários realizados na seção 4.8 no que diz respeito a relação entre o ENOS e a ocorrência de EET's; ou seja, há outros fatores que compõem (nesse caso, atividade da OMJ) um quadro conjuntural para ocorrência de OC's e até mesmo OF's.

Enfim, há estudos sobre mesmo caso da OC que foi objeto de estudo neste presente trabalho. MARENGO et al., (2022) relataram que a OC ocorrida entre setembro e outubro de 2020 não afetou somente o Brasil, mas também o Paraguai, Bolívia e áreas do norte da Argentina. Essa abrangência espacial do Calor Extremo reforça o quão extremo foi este evento, não só em duração e intensidade. Dentre os aspectos meteorológicos relacionados a ocorrência de OC's comentados anteriormente, especialmente sobre a análise deste evento no presente estudo, todos se fizeram presentes: anomalias de altura geopotencial em médios níveis indicando sistemas de alta pressão associados a bloqueios atmosféricos; condições de céu claro; baixa disponibilidade de umidade resultando em anomalias negativas de precipitação; represamento de ar anormalmente quente próximo a superfície e em baixos níveis; coluna vertical da troposfera com anomalias positivas da temperatura do ar quente; dentre outros. Além disso, foi demonstrado que na realidade esse foi um evento composto

de Calor Extremo e Seca, e que de certa forma agravou a situação de escassez hídrica que já ocorria no contexto do Brasil ao longo deste ano.

Dessa forma, os resultados apresentados no presente estudo, estão em acordo com as referências citadas anteriormente, indicando padrões sinóticos que podem ser usados como modelos conceituais para a observação e mapeamento de outros casos de OC's e OF's. Por fim, dentro do contexto da elevação das temperaturas devido ao aquecimento global (IPCC, 2023) e diante de tendências obtidas por dados observados indicando menor frequência extremos de temperaturas baixas para áreas do Brasil (REGOTO et al., 2021) e em virtude das tendências positivas com relação ao aumento total de dias em OC's, além de outras métricas (GEIRINHAS et al., 2018a, 2018b, 2021; MARENGO et al., 2025), é esperado que ao longo dos próximos anos, Eventos de Calor Extremo se tornem, ao menos, mais frequentes, podendo afetar também a duração e intensidade desses fenômenos. Já as OF's devem se tornar menos frequentes diante desse contexto, porém ainda ocorrerão (CECCHERINI et al., 2016).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho, teve por objetivo central investigar e mapear as relações entre a Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO e os valores de Temperatura Máximas e Mínimas de RMBH, RMRJ e RMSP, Além disso, busca-se identificar e caracterizar os eventos de OC's e OF's ocorridos nessas regiões, bem como entender como esses eventos estão relacionados a teleconexão ENOS, além de avaliar seus possíveis impactos sobre a Carga de Energia Elétrica do Subsistema SE/CO por meio de estudos de casos pontuais.

Inicialmente, foram apresentadas as características climatológicas dos eventos de OC's e OF's para RMBH, RMRJ e RMSP. Sob o ponto de vista da sazonalidade desses eventos para RMBH, as OC's diurnas e noturnas são mais comuns de ocorrer durante a Primavera (SON). Para RMRJ, as OC's diurnas são mais frequentes no Verão (DJF), já os casos de OC's noturnas são mais comuns na Primavera (SON). Já para RMSP, os eventos de OC's diurnas e noturnas não possuem uma sazonalidade bem definida, porém há menos registros de casos diurnos durante o Outono (MAM) e menor frequência de casos noturnos no Verão (DJF). Com relação aos eventos de OF's, em RMBH é mais comum de ocorrer durante o Outono (MAM). Já para RMRJ e RMSP, os casos de OF's diurnas são mais frequentes no Verão (DJF), porém para casos noturnos também não há uma sazonalidade bem estabelecida.

Em um aspecto geral, esses resultados demonstram que, apesar de serem regiões relativamente próximas, levando em consideração o contexto de país de dimensões continentais, não é totalmente viável estabelecer padrões sazonais em relação a quais épocas do ano são mais suscetíveis a ocorrência desses fenômenos. Além disso, realça que características locais de cada região podem exercer influência sobre esses eventos, tais como ilhas de calor urbano, maritimidade/continentalidade, relevo, dentre outros.

Já sobre o total de dias por ano em períodos de OC's e OF's, diurnas e noturnas, para RMBH, RMRJ e RMSP, não é possível observar aumento ou redução ao longo dos anos de uma forma mais clara, indo ao sentido contrário ao que referências indicam com relação a aumento da temperatura média do ar em decorrência das mudanças climáticas, assim como tendências de maior ocorrência de temperaturas elevadas e redução de temperaturas mais baixas ao longo dos últimos anos, o que provavelmente estaria ligado ao aumento de casos

de OC's e redução dos casos de OF's nessas regiões. Para essa questão, será necessário mais investigações futuras e aprimoramento metodológico, sendo que neste presente estudo, as estações meteorológicas inseridas em cada Região Metropolitana foram agrupadas por meio da média, a fim de obter uma temperatura representativa de cada região e, possivelmente, esta abordagem não é capaz de captar todas as características locais de cada base de dados utilizadas nesse estudo, “escondendo” certos sinais.

Em seguida, os resultados sobre a relação do modo de variabilidade ENOS e a ocorrência de OC's e OF's em cada Região Metropolitana indicam que não há evidências substanciais que confirmem favorecimento de OC's em decorrência de fases do ENOS, também é conferido para OF's. Neste aspecto, conclui-se que o ENOS, por si só, não explica maior ocorrência de OC's ou OF's em uma dada fase e que esse modo de variabilidade atua dentro de fatores conjunturais relacionados a ocorrência de EET's, auxiliando a explicar certos padrões atmosféricos durante esses eventos. Diante disso, torna-se oportuno expandir esse tipo de análise incorporando outros modos de variabilidade (Oscilação Decadal do Pacífico, Índice do Atlântico Tropical Sul, Índice do Atlântico Tropical Norte) e a influência de oscilações intrasazonais (por exemplo, Oscilação de Madden-Julian e Oscilação Antártica) como uma tentativa de encontrar quadros conjunturais que expliquem melhor a ocorrência desses EET's.

Já com relação as relações entre a carga normalizada de energia elétrica do subsistema SE/CO e variáveis de Tmax e Tmin de cada Região Metropolitana, foi possível observar aumento dessa relação ao longo de 2003 a 2021. Sendo que as relações eram mais discretas durante os anos de 2003 a 2010, assumindo maior expressividade a partir do ano de 2010 devido a avanços socioeconômicos, além do impacto das temperaturas mais elevadas nos últimos anos, sendo que, em média, a influência de Tmax sobre a carga de energia elétrica do SE/CO aumentou em 60% e a influência de Tmin praticamente aumentou 66% no período mais recente. Além disso, por meio dos gráficos de dispersão, foi verificado que as variáveis de Tmax e Tmin se relacionam com a carga em um formato similar a “cauda direita” de uma função de segundo grau com coeficientes positivos, porém bem suavizado.

Em um resumo geral, a evolução dessas correlações não está somente ligada a fatores meteorológicos, mas também a fatores econômicos nacionais e globais, sociais e políticos, expondo a complexidade envolvida por trás da carga de energia elétrica do SE/CO,

dificultando separar os efeitos de diferentes fatores que afetam essa variável. Ainda sob esse aspecto, há outro ponto de limitação no presente estudo e está relacionado a quantidade de estações meteorológicas utilizadas em comparação com uma área tão grande e cheia de particularidades como do Subsistema SE/CO, mesmo que essas Regiões Metropolitanas tenham participação significativa na composição da Carga do Subsistema SE/CO.

Dentre os principais resultados, estudos de casos foram usados para exemplificar como situações de calor e/ou frio extremo são capazes de provocar variações expressivas na carga de energia elétrica do Subsistema SE/CO, representando situações de estresse para a operação do SIN nestes períodos, sendo que no caso de OF houve uma redução de 5,5% abaixo do limiar percentil 10 e no caso da OC houve um aumento de 6,1% acima do limiar percentil 90. Nas seções 4.8 e 4.9, foram analisados um caso de OC (mesclada com registro diurnos e noturnos) e um caso de OF (ocorreu de forma majoritariamente noturna) que provocaram variações expressivas da carga normalizada do Subsistema SE/CO durante o ano de 2020. O primeiro caso apresentado diz respeito a OF generalizada entre as Regiões Metropolitanas, ocorrido entre 05 e 12 de maio de 2020, houve uma variação de -1.665MW médios abaixo do percentil 10 (cerca de 5,5% abaixo deste limiar), em termos de potência -319.680MWh, sendo o limiar de referência para a carga normalizada do SE/CO nesta ocasião. Já o segundo caso foi o Evento Extremo de Calor ocorrido entre 26 de setembro e 10 de outubro de 2020, período que foi verificado um desvio positivo de +2.343MW médios, ou em termos de potência +843.480MWh, acima do limiar baseado no percentil 90 diário (cerca de 6.1% acima deste limiar) da carga normalizada do SE/CO.

Além disso, foi demonstrado o quadro sinótico associado a esses eventos, com as OC's associadas a padrões de bloqueio atmosférico, massas de ar secas e muito quentes, além de condições de céu claro. Já para o caso da OF, o contexto sinótico está associado à passagem de cavados em níveis mais altos da Troposfera, com a passagem de uma frente fria e ação de alta pressão pós-frontal relacionadas a massas de ar seco e muito frio. Sendo possível traçar perfis conceituais e que auxiliam na identificação de outros casos similares.

Por fim, este estudo teve como principal objetivo mapear padrões que ajudem os órgãos regulamentadores e operadores do setor elétrico nacional a identificar possíveis situações de estresse do SIN em virtude da ocorrência de episódios de calor e frio extremo, de forma que seja possível tomar as devidas ações. E que apesar das limitações pontuadas,

este estudo surge devido a uma lacuna de conhecimento relacionados a poucos artigos científicos que demonstrem essas relações de forma mais clara no âmbito nacional.

## 6. REFERÊNCIAS

- AHMED, T.; MUTTAQI, K. M.; AGALGAONKAR, A. P. Climate change impacts on electricity demand in the State of New South Wales, Australia. *Applied Energy*, v. 98, p. 376–383, 2012.
- AIVALIOTI, S. ELECTRICITY SECTOR ADAPTATION TO HEAT WAVES. Columbia Law School, n. January, p. 188–203, 2015.
- AJJUR, S. B.; AL-GHAMDI, S. G. Global Hotspots for Future Absolute Temperature Extremes From CMIP6 Models. *Earth and Space Science*, v. 8, n. 9, p. e2021EA001817, 1 set. 2021.
- 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.
- ALI, M.; IQBAL, M. J.; SHARIF, M. Relationship between extreme temperature and electricity demand in Pakistan. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 4, n. 1, p. 1–7, 2013.
- ALIZADEH, M. R. et al. Increasing Heat-Stress Inequality in a Warming Climate. *Earth's Future*, v. 10, n. 2, p. e2021EF002488, 1 fev. 2022.
- ALLEN, M. et al. IPCC, 2018: Summary for Policymakers. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- ALMUHTADY, A. et al. Investigation of the trends of electricity demands in Jordan and its susceptibility to the ambient air temperature towards sustainable electricity generation. *Energy, Sustainability and Society*, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2019.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVAREZ, M. S. et al. Intraseasonal and low frequency processes contributing to the December 2013 heat wave in Southern South America. *Climate Dynamics*, v. 53, n. 7–8, p. 4977–4988, 1 out. 2019.

ALVES, M. Estudo da influência das variações de temperatura e umidade no comportamento da demanda de energia elétrica e formação do custo marginal de operação no Brasil. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2008.

ANA. Sistema Interligado Nacional — Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar/sin>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ANBIMA - *Associação Brasileira das Entidades dos Mercados Financeiro e de Capitais*. Disponível em: <<https://www.anbima.com.br/feriados/>>. Acesso em: 29 mar. 2023.

APADULA, F. et al. Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand. *Applied Energy*, v. 98, p. 346–356, 2012.

AQUILA, G. et al. *An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 2017

ARAÚJO, T. G. DE. Ajuste das Séries de Carga de Energia Elétrica Influenciadas pelos Ofensores Calendário e Temperatura. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

BARBOSA, P. A. M. RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E CRESCIMENTO ECONÔMICO NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL PARA O PERÍODO DE 1995 A 2017. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2019.

BARROS, V. R.; GRIMM, A. M.; DOYLE, M. E. Relationship between temperature and circulation in Southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 80, n. 1, p. 21–32, 2002.

- BECCALI, M. et al. Short-term prediction of household electricity consumption: Assessing weather sensitivity in a Mediterranean area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, out. 2008.
- BELL, Bill *et al.* The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 147, n. 741, p. 4186–4227, 1 out. 2021.
- BERRY, G.; REEDER, M. J.; JAKOB, C. A global climatology of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 4, p. 1–5, 2011.
- BEZERRA, Paula *et al.* Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households. *Energy and Buildings*, v. 234, 1 mar. 2021.
- BEZERRA, Paula *et al.* The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis. *Energy Policy*, v. 171, p. 113268, 1 dez. 2022.
- BIARDEAU, L. T. et al. Heat exposure and global air conditioning. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 1, p. 25–28, 2020a.
- BITENCOURT, D. P. et al. Frequência, Duração, Abrangência Espacial e Intensidade das Ondas de Calor no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 4, p. 506–517, dez. 2016.
- BITENCOURT, D. P. et al. 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.
- BLACK, E. et al. Factors Contributing to the Summer 2003 European Heatwave. University of Reading, UK. [s.l: s.n.].
- BLUNDEN, J. et al. State of the climate in 2018. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019. . Acesso em: 29 nov. 2019
- BOMFIM, P. R. C. M. et al. Utilização de Análise Multivariada na Avaliação do Desempenho Econômico-Financeiro de Curto Prazo: uma Aplicação no Setor de

Distribuição de Energia Elétrica. Revista do Mestrado em Administração e Desenvolvimento Empresarial da Universidade Estácio de Sá, v. 15, n. 1, p. 75–92, 2011.

BUSBY, J. W. et al. Cascading risks: Understanding the 2021 winter blackout in Texas. *Energy Research and Social Science*, v. 77, p. 102106, 2021.

CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth and Environment*, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020.

CAMPBELL, R. J. Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency Specialist in Energy Policy Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency. CRS Report for Congress, 2012.

CECCHERINI, G. et al. 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, 21 mar. 2016.

CHABOUNI, N.; BELARBI, Y.; BENHASSINE, W. Electricity load dynamics, temperature and seasonality Nexus in Algeria. *Energy*, v. 200, 1 jun. 2020.

COLLAZO, S.; BARRUCAND, M.; RUSTICUCCI, M. Variability and predictability of winter cold nights in Argentina. *Weather and Climate Extremes*, v. 26, 1 dez. 2019.

CUARTAS, Luz Adriana *et al.* Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water (Switzerland)*, v. 14, n. 4, p. 601, 1 fev. 2022.

DE SOUZA, A. et al. Analyzing Maximum Temperature Trends and Extremes in Brazil: A Study of Climate Variability and Anthropogenic Influences from 1960 to 2020. *Aerosol Science and Engineering*, p. 1–14, 27 jan. 2025.

DOMEISEN, D. I. V. et al. Prediction and projection of heatwaves. *Nature Reviews Earth & Environment* 2022 4:1, v. 4, n. 1, p. 36–50, 13 dez. 2022.

DOS REIS, N. C. S.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T. Characterization and spatial coverage of heatwaves in subtropical Brazil. *Atmosphere*, v. 10, n. 5, 1 maio 2019.

DOS SANTOS, Djacinto Monteiro *et al.* Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. *PLoS ONE*, v. 19, n. 1 January, 1 jan. 2024a.

DOS SANTOS, Lauro Correa *et al.* Energy Demand Forecasting for High Energy Consumers: A Case Study in Brazil. *International Symposium on Technology and Society, Proceedings*, 2024b.

DOS SANTOS, L. O. F. *et al.* Trends of Climate Extremes and Their Relationships with Tropical Ocean Temperatures in South America. *Earth (Switzerland)*, v. 5, n. 4, p. 844–872, 1 dez. 2024.

DU, J. *et al.* Extreme cold weather and circulatory diseases of older adults: A time-stratified case-crossover study in jinan, China. *Environmental Research*, v. 214, p. 114073, 1 nov. 2022.

DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review. *Energy Procedia*, v. 33, p. 311–321, 2013.

EBI, K. L. *et al.* Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, v. 398, n. 10301, p. 698–708, 21 ago. 2021.

EPE. *Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 21 fev. 2023.

FEIX VAZ, É.; FARRET, F. A. Correlações de Pearson entre o Consumo de Energia Elétrica e os Índices de Desenvolvimento Humano e Econômico. 2020.

FERON, S. et al. Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1–15, 2019.

FIORINI, Ana Carolina Oliveira *et al.* How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 8, p. 083001, 19 jul. 2024.

GALLO CASSARINO, T.; SHARP, E.; BARRETT, M. The impact of social and weather drivers on the historical electricity demand in Europe. *Applied Energy*, v. 229, p. 176–185, 1 nov. 2018.

GARCIA-HERRERA, R. et al. A review of the european summer heat wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 40, n. 4, p. 267–306, 2010.

GARRIDO-PEREZ, J. M. et al. Impact of climate change on Spanish electricity demand. *Climatic Change*, v. 165, n. 3–4, 1 abr. 2021.

GEIRINHAS, J. L. et al. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 4, p. 1760–1776, 2018a.

GEIRINHAS, J. L. et al. Climatic characterization of heat waves in Brazil. *Anuario do Instituto de Geociencias*, v. 41, n. 3, p. 333–350, 4 dez. 2018b.

GEIRINHAS, J. L. et al. 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, 10 fev. 2019.

GEIRINHAS, J. L. et al. Heat-related mortality at the beginning of the twenty-first century in Rio de Janeiro, Brazil. *International Journal of Biometeorology*, v. 64, n. 8, p. 1319–1332, 2020.

GEIRINHAS, J. L. et al. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 3, 2021.

GEIRINHAS, J. L. M. Caracterização Climática e Sinóptica das Ondas de Calor no Brasil. 2016.

GRIGORIEVA, E. A.; REVICH, B. A. Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century. *Atmosphere* 2021, Vol. 12, Page 1331, v. 12, n. 10, p. 1331, 12 out. 2021.

GUPTA, E. Global warming and electricity demand in the rapidly growing city of Delhi: A semi-parametric variable coefficient approach. *Energy Economics*, v. 34, n. 5, p. 1407–1421, set. 2012.

HANDAYANI, K.; FILATOVA, T.; KROZER, Y. The vulnerability of the power sector to climate variability and change: Evidence from Indonesia. *Energies*, v. 12, n. 19, 2019.

HE, Y. et al. Substantial increase of compound droughts and heatwaves in wheat growing seasons worldwide. *International Journal of Climatology*, v. 42, n. 10, p. 5038–5054, 1 ago. 2022.

HIRATSUKA ESTAVARE, F. Análise dos Impactos da Covid-19 no Mercado Brasileiro de Energia Elétrica. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2022.

HOFFMANN, R. Transferências de renda e desigualdade no Brasil (1995-2011). Em: *Programa Bolsa Família - uma década de inclusão e cidadania*. [s.l.] Ipea, 2013.

HU, X. et al. Economic and environmental impacts of different ventilation systems in detached rural houses in severe cold climate. *Journal of Building Engineering*, v. 99, p. 111689, 1 abr. 2025.

HUANG, X. et al. Study on the resilience recovery of civil airport infrastructure under weather extremes. *Natural Hazards*, v. 121, n. 1, p. 1143–1163, 1 jan. 2024.

HUNT., J. D.; STILPEN, D.; DE FREITAS, M. A. V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 88, n. October 2017, p. 208–222, 2018.

ICEA. *ICEA*. Disponível em: <<https://www.icea.decea.mil.br/>>. Acesso em: 20 maio 2023.

I C. FIGUEIRÓ *et al.* Previsão de Carga de Curto Prazo para grandes áreas geográficas considerando ponderação por Região Meteorológica. *In: SBA Sociedade Brasileira de Automática*, 2018.

IBGE. Regiões Metropolitanas, Aglomerações Urbanas e Regiões Integradas de Desenvolvimento. 2023.

IPCC. GLOBAL WARMING OF 1.5 °C. p. 651-, 2018.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report | UNEP - UN Environment Programme. 2023.

JAFARPUR, P.; BERARDI, U. Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints. *Journal of Building Engineering*, v. 42, p. 102725, 1 out. 2021.

JOBÁGY, P.; BAI, A. THE EFFECTS OF THE GLOBAL ECONOMIC CRISIS ON THE MARKETS FOR FOSSIL AND RENEWABLE FUELS. *Environmental Economics and Policy*, 2012. Acesso em: 7 jul. 2025.

KHAN, M.; BHATTARAI, R.; CHEN, L. Assessment of Deadly Heat Stress and Extreme Cold Events in the Upper Midwestern United States. *Atmosphere*, v. 15, n. 5, p. 614, 1 maio 2024.

KHOSLA, R.; JANI, A.; PERERA, R. Health risks of extreme heat. *BMJ*, v. 375, 7 out. 2021.

KHRAISHAH, H. et al. Climate change and cardiovascular disease: implications for global health. *Nature Reviews Cardiology* 2022 19:12, v. 19, n. 12, p. 798–812, 7 jun. 2022.

KOPYTKO, N.; PERKINS, J. Climate change, nuclear power, and the adaptation-mitigation dilemma. *Energy Policy*, v. 39, n. 1, p. 318–333, 2011.

KÖBERLE, A. C. et al. Brazil's emission trajectories in a well-below 2 °C world: the role of disruptive technologies versus land-based mitigation in an already low-emission energy system. *Climatic Change*, v. 162, n. 4, p. 1823–1842, 1 out. 2020.

KUMAR, P. et al. Climate change consequences and its impact on agriculture and food security. *International Journal of Chemical Studies*, v. 6, n. 6, p. 124–133, 2018.

LA SORTE, F. A.; JOHNSTON, A.; AULT, T. R. Global trends in the frequency and duration of temperature extremes. *Climatic Change*, v. 166, n. 1–2, p. 1–14, 1 maio 2021.

LANFREDI, I. S.; DE CAMARGO, R. Classification of extreme cold incursions over South America. *Weather and Forecasting*, v. 33, n. 5, p. 1183–1203, 2018.

LAWLOR, J. A. et al. Mechanisms, detection and impacts of species redistributions under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment* 2024 5:5, v. 5, n. 5, p. 351–368, 18 abr. 2024.

LECOMTE, D. U.S. Weather Highlights 2022—Drought, Flash Floods, Severe Outbreaks, Hurricane Ian, Blockbuster Winter Storms. *Weatherwise*, v. 76, n. 3, p. 14–22, 4 maio 2023.

LIBONATI, R. et al. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 1, 2022.

LIN, J.; QIAN, T. A New Picture of the Global Impacts of El Nino-Southern Oscillation. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1–7, 2019.

LINDSEY, REBECCA; DAHLMAN, L. Climate Change: Global Temperature | NOAA Climate.gov. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>>. Acesso em: 29 nov. 2019.

LIU, C. Y. et al. Impact of the cold surge event in January 2021 on the power system of China. *Advances in Climate Change Research*, v. 13, n. 6, p. 803–810, 2022.

LÓPEZ ZAFRA, J. M.; SÁNCHEZ DE TEMBLEQUE, L. J.; MENEU FERRER, V. Impactos Sobre El Sector Energético. *Impactos del cambio climático en España*, p. 618–652, 2005.

LÓPEZ-BUENO, J. A. et al. The effect of cold waves on mortality in urban and rural areas of Madrid. *Environmental Sciences Europe*, v. 33, n. 1, p. 1–14, 1 dez. 2021.

LUCENA, A. F. P. et al. Interactions between climate change mitigation and adaptation: The case of hydropower in Brazil. *Energy*, v. 164, p. 1161–1177, 1 dez. 2018.

MAÇAIRA, P. et al. Forecasting residential electricity consumption: a bottom-up approach for Brazil by region. *Energy Efficiency*, v. 13, n. 5, p. 911–934, 1 jun. 2020.

MARENGO, Jose A. *et al.* Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Frontiers in Climate*, v. 7, 2025.

MARENGO, J. et al. A cold wave of winter 2021 in central South America: characteristics and impacts. *Climate Dynamics*, v. 61, n. 5–6, p. 2599–2621, 1 set. 2023.

MARENGO, J. A. et al. Climate change in central and South America - recent trends, future projections and impactos on Regional Agriculture. v. 73, 2014.

MARENGO, J. A. et al. The heat wave of October 2020 in central South America. [s.l: s.n.]. v. 42

MARENGO, J. A. et al. Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Frontiers in Climate*, v. 7, 2025.

MATHIAS, J. F. C. M. et al. ATIVIDADE ECONÔMICA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: UMA ABORDAGEM BASEADA NA PESQUISA INDUSTRIAL ANUAL DO IBGE. v. 21, n. 1, p. 71–90, 2015.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. Climate Change and Its Impact on Agriculture. *Agrometeorology*, v. 4, n. 4, p. 275–302, 2020.

MCEVOY, D.; AHMED, I.; MULLETT, J. The impact of the 2009 heat wave on Melbourne’s critical infrastructure. *Local Environment*, v. 17, n. 8, p. 783–796, 2012.

MECKING, J. V. et al. Ocean and atmosphere influence on the 2015 European heatwave. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 11, 2019.

MEHRABI, Z. et al. Research priorities for global food security under extreme events. *One Earth*, v. 5, n. 7, p. 756–766, 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Conheça as instituições do setor elétrico brasileiro e as competências de cada uma — Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-as-instituicoes-do-setor-eletrico-brasileiro-e-as-competencias-de-cada-uma>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

MIRANDA, V. F. V. V. et al. Heat stress in South America over the last four decades: a bioclimatic analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 911–928, 1 fev. 2024.

MIRANDA, R. M. DE. Urban heat island in the metropolitan area of São Paulo and the influence of warm and dry air masses during summer. v. 2014, 2015.

MIRASGEDIS, S. et al. Models for mid-term electricity demand forecasting incorporating weather influences. *Energy*, v. 31, n. 2–3, p. 208–227, 2006.

MOREIRA, M.; OHISHI, T. Um estudo de caso para previsão de médio prazo de consumo de energia elétrica. XLVII Simpósio de Pesquisa Operacional, p. 10, 2015.

MUKHERJEE, S. et al. A study on the correlation of anthropogenic activities with climate change. *Environmental Quality Management*, v. 33, n. 4, p. 59–71, 1 jun. 2024.

MÜLLER, G. V.; BERRI, G. J. Atmospheric circulation associated with persistent generalized frosts in Central-Southern South America. *Monthly Weather Review*, v. 135, n. 4, p. 1268–1289, 2007.

NOAA. *Climate Prediction Center. National Weather Service*. [S.l: s.n.]. 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: 29 nov. 2019. , 2023

NOGUEIRA, L. A. H. Package of measures to promote efficient air conditioning. WEC ADEME project on energy efficiency policies, 2013.

OLIVEIRA, T. P. DE. Diagnóstico e análise de Ondas de Calor e de Frio em Minas Gerais. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2019.

OLMO, M.; BETTOLLI, M. L.; RUSTICUCCI, M. Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern South America. *Weather and Climate Extremes*, v. 29, 1 set. 2020.

ONS. O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL CONCEITOS, MODELAGEM MATEMÁTICA, PREVISÃO DE GERAÇÃO E CARGA. [s.l: s.n.].

ONS. Histórico da Operação. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>>. Acesso em: 8 maio 2023.

ONS. O Sistema em Números. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 15 mar. 2025a.

ONS. Mapas Geométrico do Sistema Interligado Nacional brasileiro. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 15 mar. 2025b.

ONS. Acervo de Conhecimento - ONS. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>>. Acesso em: 15 mar. 2025c.

PARDO, A.; MENEU, V.; VALOR, E. Temperature and seasonality influences on Spanish electricity load. *Energy Economics*, v. 24, n. 1, p. 55–70, 2002.

PARLIARI, D.; GIANNAROS, C.; KEPPAS, S. Assessment of Heat and Cold Waves Phenomena and Impacts on Environment. p. 141–167, 2022.

PAVANELLO, F. et al. Air-conditioning and the adaptation cooling deficit in emerging economies. *Nature Communications* 2021 12:1, v. 12, n. 1, p. 1–11, 9 nov. 2021.

PERES, L. DE F. et al. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 64, n. August 2017, p. 104–116, 2018.

PEZZA, A. B.; AMBRIZZI, T. Dynamical conditions and synoptic tracks associated with different types of cold surge over tropical South America. *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 2, p. 215–241, 2005.

PROPATO, T. S. et al. Differential sensitivities of electricity consumption to global warming across regions of Argentina. *Climatic Change*, v. 166, n. 1–2, 1 maio 2021.

RADEMAEKERS, K. et al. Investment needs for future adaptation measures in EU nuclear power plants and other electricity generation technologies due to effects of climate change. *Energy*, n. March, p. 1–222, 2011.

RAWAT, A.; KUMAR, D.; KHATI, B. S. A review on climate change impacts, models, and its consequences on different sectors: a systematic approach. *Journal of Water and Climate Change*, v. 15, n. 1, p. 104–126, 1 jan. 2024.

REBOITA, M. S. *et al.* Impacts of teleconnection patterns on South America climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1504, n. 1, p. 116–153, 2021.

REGOTO, P. et al. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 11, p. 5125–5142, 2021.

RICARDI, A. DE M. VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA EROSIVIDADE DAS CHUVAS (EI30) NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. [s.l.] UNESP, 2020.

RICCI, F.; CASSON MORENO, V.; COZZANI, V. Natech accidents triggered by cold waves. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 173, p. 106–119, 1 maio 2023.

RÜBBELKE, D.; VÖGELE, S. Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector. *Environmental Science & Policy*, v. 14, n. 1, p. 53–63, 1 jan. 2011.

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

RYTI, N. R. I.; GUO, Y.; JAAKKOLA, J. J. K. 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.

SANTÁGATA, D. M. et al. Extreme temperature events affecting the electricity distribution system of the metropolitan area of Buenos Aires (1971–2013). *Energy Policy*, v. 106, n. June 2016, p. 404–414, 2017.

SANTOS, A. J. L.; LUCENA, A. F. P. Climate change impact on the technical-economic potential for solar photovoltaic energy in the residential sector: a case study for Brazil. *Energy and Climate Change*, v. 2, p. 100062, 1 dez. 2021.

SANTOS, D. M. et al. Twenty-first-century demographic and social inequalities of heat-related deaths in Brazilian urban areas. **PLoS ONE**, v. 19, n. 1 January, 1 jan. 2024.

SANTOS, H. N. L. DOS; FONSECA, R. R. DA. CRESCIMENTO ECONÔMICO NA ERA LULA (2003-2010): CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS. *HOLOS*, v. 5, n. 5, p. 2022, 28 dez. 2022.

SATHAYE, Jayant A. *et al.* Estimating impacts of warming temperatures on California's electricity system. *Global Environmental Change*, v. 23, n. 2, p. 499–511, 1 abr. 2013.

SCAPIN, S. et al. High-resolution temperature fields to evaluate the response of Italian electricity demand to meteorological variables: an example of climate service for the energy sector. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 125, n. 3–4, p. 729–742, 1 ago. 2016.

SCHAEFFER, Roberto *et al.* Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy*, v. 38, n. 1, p. 1–12, 1 fev. 2012.

SCHETTINI, B. P. et al. New empirical evidence on the quarterly dynamics of Brazilian aggregate household consumption from 1995 to 2009. *Economia e Sociedade*, v. 21, n. 3, p. 607–641, dez. 2012.

SENA, C. A. P.; FRANÇA, J. R. A.; PERES, L. F. Study of heat islands in the metropolitan area of Rio de Janeiro using data from MODIS [Estudo da ilha de calor na

região metropolitana do Rio de Janeiro usando dados do MODIS]. Anuario do Instituto de Geociencias, v. 37, n. 2, p. 111–122, 2014.

SEPPELT, R. et al. Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge. iScience, v. 25, n. 12, p. 105551, 2022.

SERRANO, André Luiz Marques *et al.* Statistical Comparison of Time Series Models for Forecasting Brazilian Monthly Energy Demand Using Economic, Industrial, and Climatic Exogenous Variables. Applied Sciences (Switzerland), v. 14, n. 13, 1 jul. 2024.

SHERMAN, P.; LIN, H.; MCELROY, M. Projected global demand for air conditioning associated with extreme heat and implications for electricity grids in poorer countries. Energy and Buildings, v. 268, p. 112198, 1 ago. 2022.

SILVA, A. L. et al. Comparing Observed and Reanalysis Data for Trends in Heat and Cold Waves in Brazil (1996–2022). , 26 nov. 2024. Disponível em:  
<<https://www.researchsquare.com/article/rs-5412154/v1>>

SILVA, N. R. DA. Demanda De Energia Elétrica Residencial No Brasil Segundo Os Quantis De Consumo. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2013.

SULCA, J. et al. Climatology of extreme cold events in the central Peruvian Andes during austral summer: origin, types and teleconnections. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 144, n. 717, p. 2693–2714, 1 out. 2018.

SULI, S. et al. Regionalisation of heat waves in southern South America. Weather and Climate Extremes, v. 40, 1 jun. 2023.

TAVARES, C. DE M. G.; FERREIRA, C. DE C. M. A RELAÇÃO ENTRE A OROGRAFIA E OS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS- RJ. Revista Brasileira de Climatologia, v. 26, p. 833–853, 2020.

TOMCZYK, A. M.; BEDNORZ, E. Heat waves in Central Europe and tropospheric anomalies of temperature and geopotential heights. *International Journal of Climatology*, v. 39, n. 11, p. 4189–4205, 2019.

TRIGO, R. M. et al. Evaluating the impact of extreme temperature based indices in the 2003 heatwave excessive mortality in Portugal. *Environmental Science and Policy*, v. 12, n. 7, p. 844–854, 2009.

UMEZAKI, A. S. et al. Numerical characterization of spatial and temporal evolution of summer urban heat island intensity in São Paulo, Brazil. *Urban Climate*, v. 32, n. January, p. 100615, 2020.

VAN VLIET, M. T. H. et al. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Climate Change*, v. 2, n. 9, p. 676–681, 2012.

VASQUEZ ARROYO, E. et al. Climate impacts in the Brazilian energy security: Analysis of observed events and adaptation options. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, p. 157–196, 4 jan. 2021.

VINE, E. Adaptation of California's electricity sector to climate change. *Climatic Change*, v. 111, n. 1, p. 75–99, 2012.

WANG, K.; WANG, J.; SONG, Y. Resilience-enhanced Power System Dispatch Amidst Extreme Blizzard Events. 2024 IEEE 2nd International Conference on Power Science and Technology, ICPST 2024, p. 2256–2262, 2024.

WANG, Y.; LU, B.; HAN, Z. Rapid increase of the nighttime electricity demand in Beijing due to compound heatwaves. *Urban Climate*, v. 50, p. 101595, 1 jul. 2023.

WARD, D. M. The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. *Climatic Change*, v. 121, n. 1, p. 103–113, 2013.

WU, S. et al. Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves. *npj Climate and Atmospheric Science* 2023 6:1, v. 6, n. 1, p. 1–13, 15 maio 2023.

WU, Y. et al. Global Observations and CMIP6 Simulations of Compound Extremes of Monthly Temperature and Precipitation. *GeoHealth*, v. 5, n. 5, p. e2021GH000390, 1 maio 2021.

XIONG, J.; YANG, Y. Climate Change and Hydrological Extremes. *Current Climate Change Reports* 2024 11:1, v. 11, n. 1, p. 1–14, 2 out. 2024.

YANG, Y. et al. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. *Science (New York, N.Y.)*, v. 385, n. 6713, p. eadn3747, 6 set. 2024.

ZENG, P. et al. Significant social inequalities exist between hot and cold extremes along urban-rural gradients. *Sustainable Cities and Society*, v. 82, p. 103899, 1 jul. 2022.

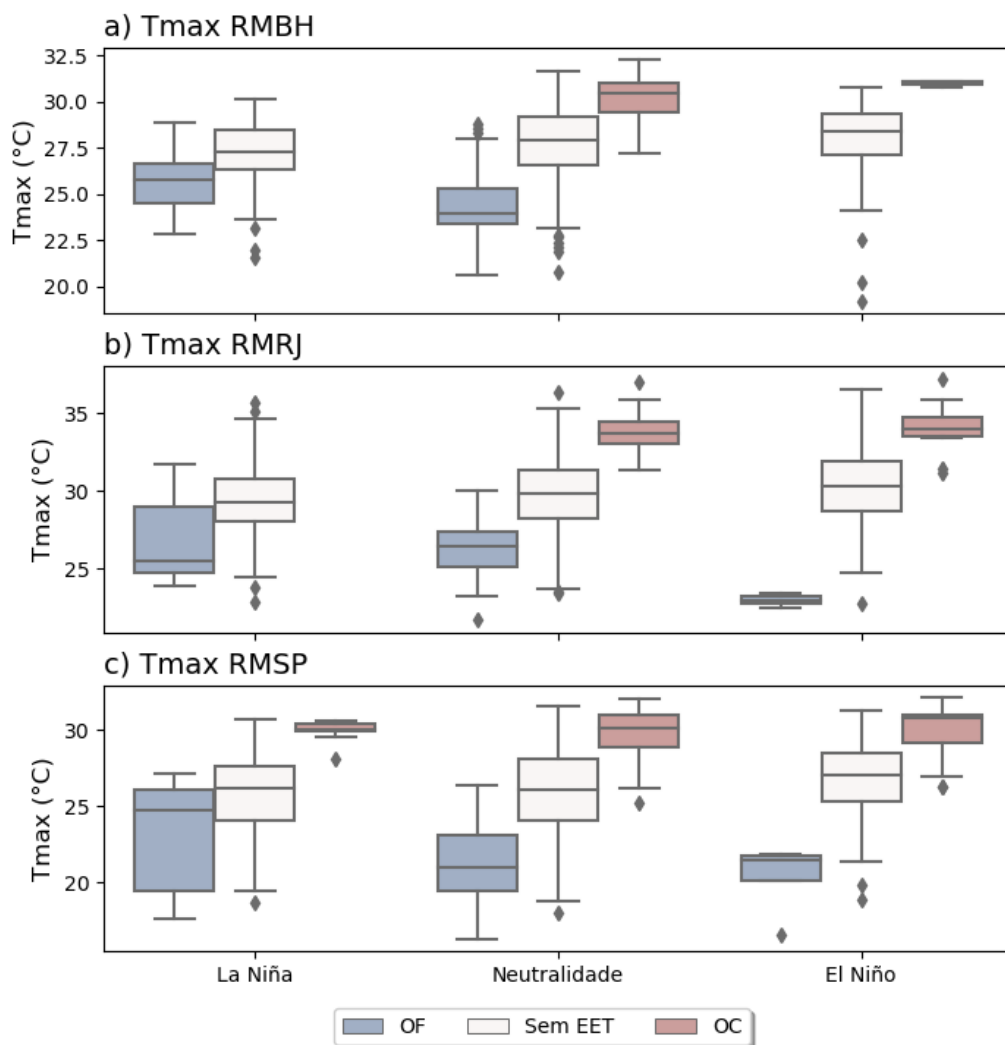
ZHANG, X. et al. Energy flexibility and resilience analysis of demand-side energy efficiency measures within existing residential houses during cold wave event. *Building Simulation*, v. 17, n. 7, p. 1043–1063, 1 jul. 2024.

ZHANG, Y. et al. Growing prevalence of heat over cold extremes with overall milder extremes and multiple successive events. *Communications Earth & Environment* 2022 3:1, v. 3, n. 1, p. 1–13, 1 abr. 2022.

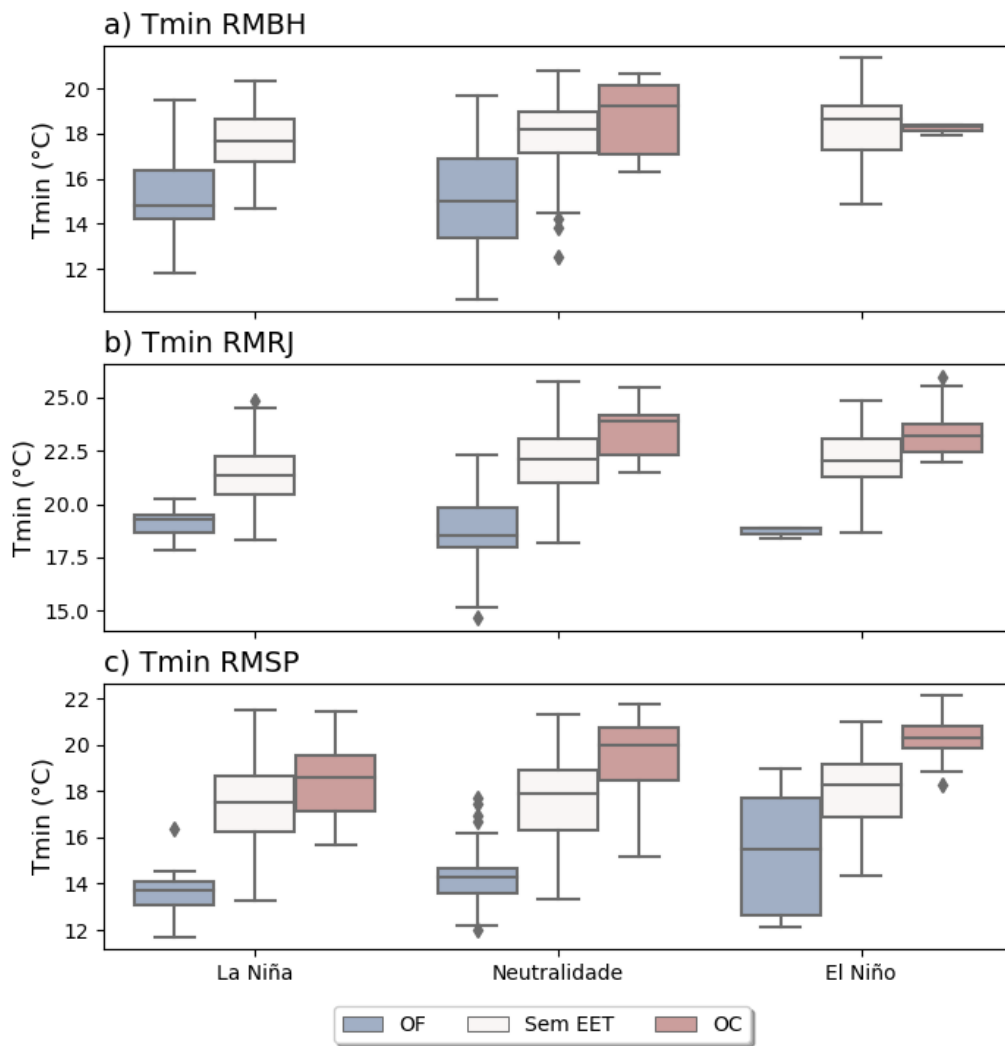
ZHOU, S.; YU, B.; ZHANG, Y. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change. *Science Advances*, v. 9, n. 10, 10 mar. 2023.

ZUIN, G. et al. Extreme event counterfactual analysis of electricity consumption in Brazil: Historical impacts and future outlook under climate change. *Energy*, v. 281, p. 128101, 15 out. 2023.

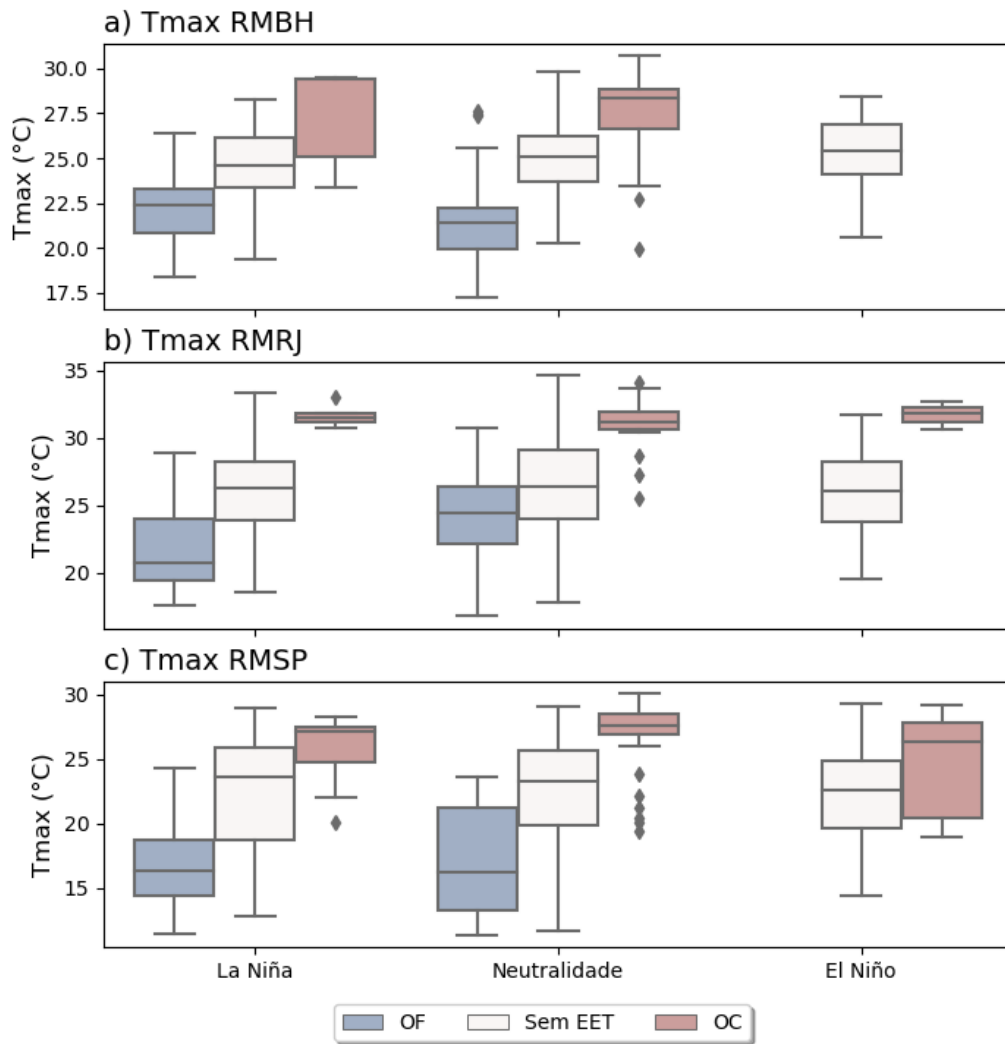
## ANEXO I



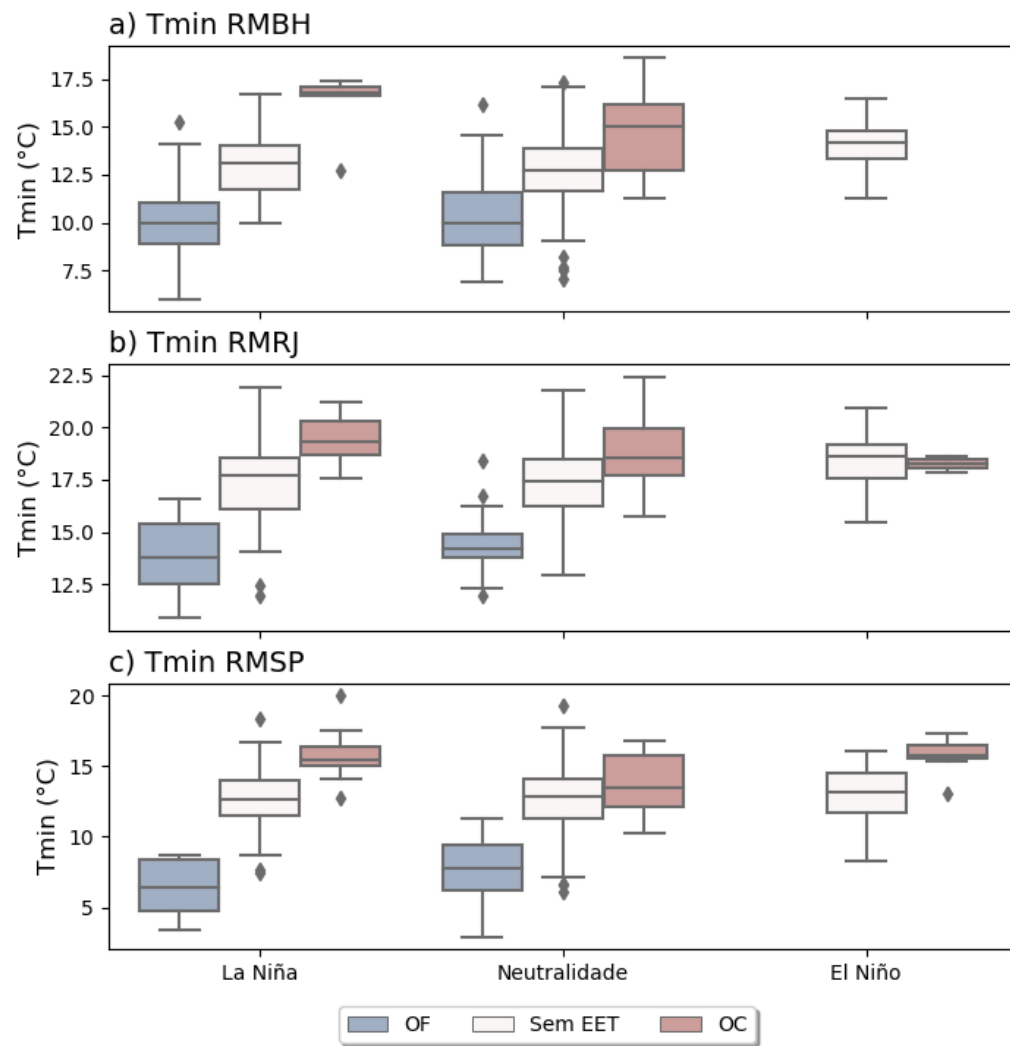
A 1: Boxplots para a Temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Outono (MAM).



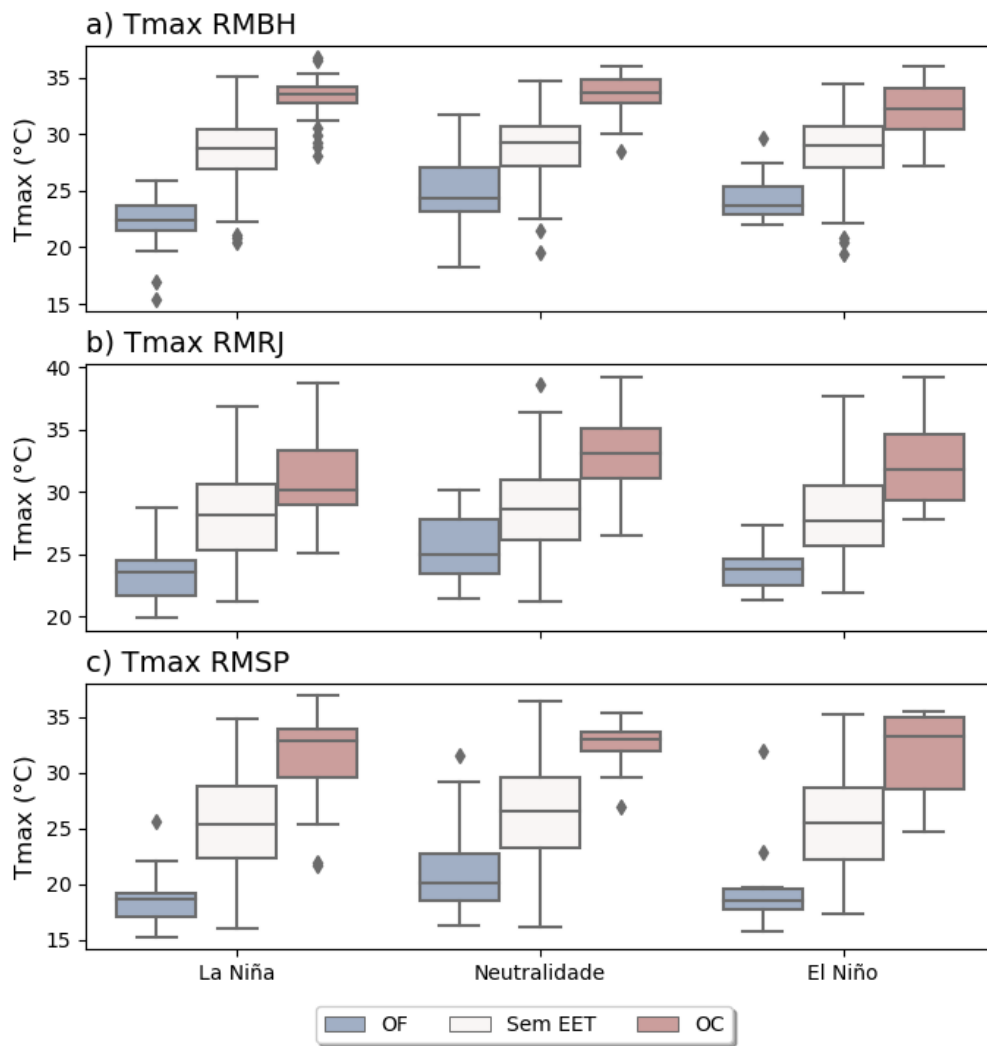
A 2: Boxplots para a Temperatura mínima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Outono (MAM).



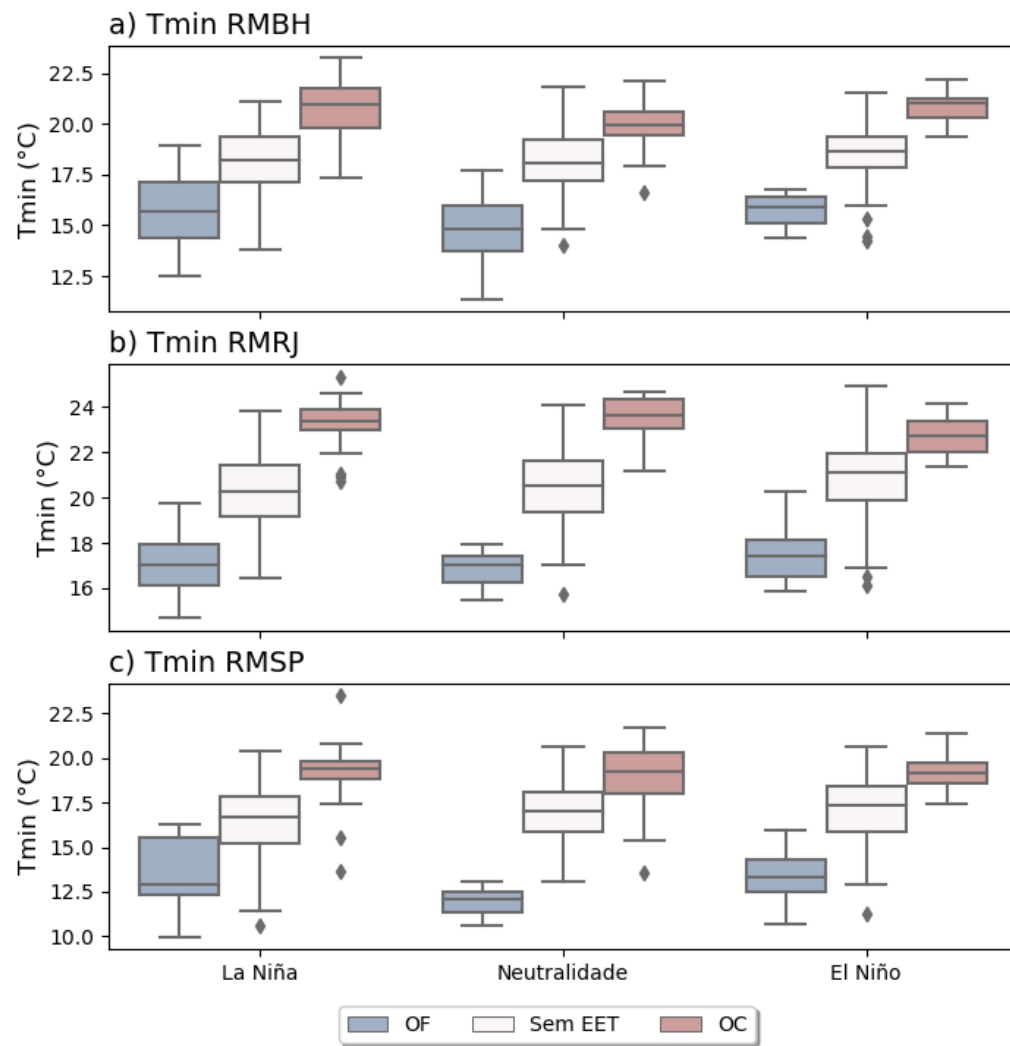
A 3: Boxplots para a Temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Inverno (JJA).



A 4: Boxplots para a Temperatura mínima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Inverno (JJA).



A 5: Boxplots para a Temperatura máxima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Primavera (SON).



A 6: Boxplots para a Temperatura mínima de RMBH, RMRJ e RMSP (letras, a, b e c, respectivamente), considerando os casos de OC's, OF's e sem ocorrência de Eventos Extremos de Temperatura (EET) para as diferentes fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante a estação do Primavera (SON).