

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Eduardo Erpen Fronza

**CARACTERIZANDO ONDAS DE CALOR NO CENTRO-SUL DO
BRASIL, DE 1980 A 2019**

Florianópolis
2020

Eduardo Erpen Fronza

**CARACTERIZANDO ONDAS DE CALOR NO CENTRO-SUL DO
BRASIL, DE 1980 A 2019**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para a Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Regina Rodrigues Rodrigues

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fronza, Eduardo Erpen
CARACTERIZANDO ONDAS DE CALOR NO CENTRO-SUL DO BRASIL,
DE 1980 A 2019 / Eduardo Erpen Fronza ; orientadora,
Regina Rodrigues Rodrigues, 2020.
48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Mudanças
Climáticas. 3. Eventos Extremos. 4. Bloqueios
Atmosféricos. 5. Ondas de Calor. I. Rodrigues, Regina
Rodrigues. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Eduardo Erpen Fronza

**CARACTERIZANDO ONDAS DE CALOR NO CENTRO-SUL DO BRASIL, DE 1980
A 2019**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina e aprovado em sua forma final.

Florianópolis, 09 de dezembro de 2020.

Prof.^a Maria Elisa Magri, Dr.^a

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Regina Rodrigues Rodrigues, Dr.^a

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Marina Hirota Magalhães, Dra.^a

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedicado à todas que lutaram e lutarão pela
construção de outros mundos possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, por ter estado presente e me apoiando ao longo de toda minha caminhada, e por ter dedicado e ainda dedicar muito do seu tempo de vida para que eu pudesse ser quem sou e estar onde estou hoje. Essa conquista não teria sido possível sem ela.

Agradeço aos amigos e amigas do NEAmb, lugar de encontro com inumeráveis pessoas muito especiais que passaram pelo meu caminho, e que foram minha segunda família durante os anos da faculdade, me ajudando a encontrar meu propósito e a crescer enquanto pessoa. Pedro, Isabela, Luiz Gabriel, Maria Gabriela, Gustavo, Mariah, Augusto, Natália, Jonas, Rodrigo, Marília, Juliana, Nicolas, Mariana e outros tantos e tantas. São muitos para serem citados aqui, mas lembro de todos e todas com muito carinho. Obrigado pelas trocas e experiências vividas.

Ao Caio, pelos cafés e conversas entre aulas, por ser um grande amigo e por ter tornado a difícil jornada da graduação muito mais suportável e divertida.

À Taisa, pelo carinho, cuidado e apoio incondicional. Por ter escolhido me acompanhar e por ser uma das pessoas mais especiais que já conheci na vida.

Aos colegas Natasha, Micael e Maria Fernanda, por todas as dicas e recomendações valiosas que facilitaram meu caminho de aprendizado no processo de elaboração desse trabalho.

Ao Pablo Borges, pela parcela de responsabilidade que teve em fazer com que o desenvolvimento desse trabalho fosse possível.

À minha professora orientadora, Regina R. Rodrigues, uma pessoa de notório saber e personalidade admirável, que abriu as portas para me receber em seu laboratório mesmo sem me conhecer, e possibilitou que eu desenvolvesse esse trabalho na minha área de interesse.

Aos professores Pedro Chaffe, Leonardo Hoinaski, Maria Eliza Nagel, Maria Elisa Magri e Rodrigo Mohedano, pela inspiração, influência, parcerias e por serem minhas referências dentro do departamento.

Por fim, ao CNPQ e à Rede CLIMA pelo financiamento concedido para condução dessa pesquisa, e pelo trabalho importante e necessário de financiamento e desenvolvimento da ciência nacional, nesses tempos tão esquisitos.

À todas as outras pessoas não citadas aqui, mas que foram importantes para mim de alguma forma e o sabem: meu muito obrigado.

“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento. Mas ninguém diz violentas as margens que o comprimem.”

Bertolt Brecht

RESUMO

As mudanças climáticas afetam substancialmente a sociedade, atingindo especialmente às populações mais vulneráveis e países em desenvolvimento. Ao longo dos últimos anos, os impactos das mudanças climáticas têm tornado os eventos extremos de calor, vento e precipitação cada vez mais frequentes e intensos. Modelos de circulação climática globais e regionais convergem nos resultados que apontam para um aumento na intensidade e frequência de eventos de Onda de Calor (OC) para projeções climáticas futuras. Em linhas gerais, uma OC pode ser definida como um período prolongado de temperatura acima de um limiar climatológico esperado para uma determinada região e época do ano específica. Os impactos das OCs são diversos, afetando desde setores produtivos como agricultura e centrais de geração de energia, a saúde dos ecossistemas, incêndios florestais, até internações hospitalares por estresse térmico e perda de vidas humanas. Estudos conduzidos previamente apontaram que eventos de OC podem estar associados à bloqueios atmosféricos, que são caracterizados por sistemas de alta pressão estacionários que bloqueiam padrões de circulação atmosférica comumente observados em condições de normalidade climatológica nas latitudes médias. Essa relação foi encontrada para diversos eventos de OC e calor extremo no Hemisfério Norte, e mais recentemente para eventos de OC no Hemisfério Sul. Ainda assim, pesquisas caracterizando estes eventos na América do Sul ainda são bastante recentes e não numerosas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é caracterizar eventos de OC na região centro-sul do Brasil de 1980 a 2019, e investigar sua relação com a ocorrência de bloqueios atmosféricos. A metodologia adotada neste estudo, define as OCs como um período de três ou mais dias consecutivos com temperatura máxima diária acima do 90º percentil. Após a detecção, foram analisadas as propriedades de intensidade, duração e frequência das OCs. As tendências de evolução destas propriedades ao longo do tempo foram computadas para a área de estudo, e foram traçadas as assinaturas de condições meteorológicas concomitantes aos eventos para diferentes municípios da região. Foram encontrados padrões meteorológicos semelhantes para os eventos nos diferentes municípios investigados, apresentando comportamentos condizentes com a definição climática de bloqueios atmosféricos. Os resultados demonstraram uma relação direta entre eventos de OC e anomalias de precipitação sobre diferentes regiões. Foi observada uma tendência generalizada de aumento no número de dias de OC para quase toda a região Sudeste e Centro-Oeste, e ao nordeste da região Sul. Tendências de aumento estatisticamente significativas para frequência, intensidade e duração dos eventos foram identificadas para diferentes regiões dentro da área de estudo. Os resultados sugerem que as variabilidades climáticas naturais conhecidas e associadas aos mecanismos que provocam estes eventos não são suficientes para explicar a magnitude das tendências crescentes observadas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Eventos Extremos. Bloqueios Atmosféricos. Ondas de Calor.

ABSTRACT

Climate change affects society substantially, being vulnerable communities and developing countries the most impacted. Along the past decades, climate change has made extreme events of heat, wind and precipitation more frequent and intense. Global and regional circulation models converge on the results that point towards an increase in the intensity and frequency of heatwave events (HWs) for future climate projections. Generally, a HW can be understood as an extended period of temperature above a defined climatologic threshold expected for a particular region and time of the year. Impacts of HW are several, affecting productive sectors such as agriculture and energy plants, ecosystems health, wildfires, extending to human hospitalization and live loss. Previously conducted studies have associated HWs with atmospheric blocking, which are characterized by high pressures stationary systems that block atmospheric circulation patterns expected under climate normality conditions in mid-latitudes. This relationship was found under several HW and extreme heat events for the Northern Hemisphere, and more recently for HW events in the Southern Hemisphere. Although, research works characterizing such events for South America are recent and not numerous. Given that, the objective of this study is to characterize AHWs on Brazil south-central region for the period from 1980 to 2019 and investigate their relationships with atmospheric blocking occurrence. The methodology applied in this study defines HWs as being a period of three or more consecutive days of daily maximum temperature above the 90th percentile. Once detected, their properties of intensity, duration, and frequency were also analyzed. Trends for the evolution of those properties through time were computed for the study area, and meteorological signatures of the events were traced for defined cities within that region. Similar meteorological patterns have been found for the HW events in different cities investigated, which are also consistent with the climate definition of atmospheric blocking. Results show a direct relation between HW events and precipitation anomalies over different regions. An increasing trend for HW number of days was observed through most of the Southeast and Central-West Brazilian regions, as for the north-eastern of South region. Statistically significant trends for frequency, intensity and duration of the events were found for different regions within the study area. Results also suggest that natural climate variabilities known to influence in the occurrence of these events are not sufficient to explain the magnitudes of increasing trends observed.

Keywords: Climate Change. Extreme Events. Atmospheric Blocking. Heatwaves.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação esquemática da influência da MJO no desencadeamento de um trem de ondas de Rossby, responsável pelo bloqueio atmosférico ativo que desencadeou a OCM massiva de 2013/2014. Fonte: (Rodrigues et al., 2019)..... 16
- Figura 2.** Histórico de monitoramento da média anual do índice da Oscilação Interdecadal do Pacífico. Fases positivas (negativas) são representadas por índices positivos (negativos). Fonte: (MET OFFICE, 2016)..... 17
- Figura 3.** Mapa de localização da região de estudo. Pontos brancos indicam os municípios onde foram conduzidas as análises: Florianópolis/SC (FLN), Curitiba/PR (CWB), Porto Alegre/RS (POA), São Paulo/SP (SP), Rio de Janeiro/RJ (RJ), Belo Horizonte/MG (BH), Brasília/DF (BSB), Vitória/ES (VIX), Campo Grande/MS (CGR), Cuiabá/MT (CGB), São José do Rio Preto/SP (SJP) e Maringá/PR (MGF). Fonte: Elaborado pelo autor, dados obtidos de FICK & HIJMANS (2017). 20
- Figura 4.** Evolução temporal dos eventos de OC registrados para as cidades de Florianópolis, Curitiba, Porto Alegre. Figuras na linha superior (inferior) representam eventos durante todo o ano (durante o verão austral). Cada evento é representado por uma barra, barras vermelhas indicam o evento de maior duração para cada cidade (em caso de empate é destacado o primeiro evento de maior duração). Eixo horizontal superior representa o acumulado de eventos. Fonte: Elaborado pelo autor..... 24
- Figura 5.** Mesmo que Figura 4, para as cidades de São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Belo Horizonte (BH). Fonte: Elaborado pelo autor..... 25
- Figura 6.** Mesmo que Figura 4, para as cidades de Brasília (BSB), Vitória (VIX) e Campo Grande (CGR). Fonte: Elaborado pelo autor. 25
- Figura 7.** Mesmo que Figura 4, para as cidades de Cuiabá (CGB), São José do Rio Preto (SJP) e Maringá (MGF). Fonte: Elaborado pelo autor. 26
- Figura 8.** Número de dias participantes em eventos de OC para as cidades de Florianópolis (FLN), Curitiba (CWB) e Porto Alegre (POA). Figuras na linha superior (inferior) representam eventos durante todo o ano (durante o verão austral). Uma linha tracejada azul marca a transição da OIP para sua fase negativa (fria), coincidentemente separando a série temporal entre primeira e segunda metade. A linha tracejada vermelha marca a transição da fase negativa da OIP para uma nova fase positiva (quente). Fonte: Elaborado pelo autor. 27
- Figura 9.** Mesmo que Figura 8, para as cidades de São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), e Belo Horizonte (BH). Fonte: Elaborado pelo autor..... 27
- Figura 10.** Mesmo que Figura 8, para as cidades de Brasília (BSB), Vitória (VIX) e Campo Grande (CGR). Fonte: Elaborado pelo autor. 28
- Figura 11.** Mesmo que Figura 8, para as cidades de Cuiabá (CGB), São José do Rio Preto (SJP) e Maringá (MGF). Fonte: Elaborado pelo autor. 28
- Figura 12.** Comparação de dias de OC coincidentes entre diferentes municípios, identificados separadamente em cada gráfico. Uma linha tracejada azul marca a transição da OIP para

sua fase negativa (fria), coincidentemente separando a série temporal entre primeira e segunda metade. A linha tracejada vermelha marca a transição da fase negativa da OIP para uma nova fase positiva (quente). Fonte: Elaborado pelo autor. 29

Figura 13. Primeira linha: figuras **a.**, **b.**, **c.** e **d.**, respectivamente: média das métricas de Frequência, Intensidade Média, Intensidade Máxima e Duração das OCs registradas durante o verão austral (dezembro, janeiro, fevereiro) para o período de 1980 a 2019, com as unidades de **a.** nº de eventos por verão; **b.** e **c.** °C; e **d.** dias. Segunda linha: valores de tendências decenais estimadas através de regressão linear simples para cada uma das métricas apresentadas na linha 1, com as mesmas unidades para **e.**, **f.**, **g.** e **h.**, respectivamente. Pontilhados indicam tendências significativas para um intervalo de confiança estatístico de 95%, calculadas pelo teste de Mann-Kendall. Fonte: Elaborado pelo autor. 32

Figura 14. Valores encontrados para a métrica de número total de dias de Onda de Calor por verão. **a.** número médio de dias de OC por verão para o período de 1980-2019, **b.** tendências decenais de aumento/decrécimo no número dias de OC por verão. Pontilhados indicam tendências significativas para um intervalo de confiança estatístico de 95%, calculadas pelo teste de Mann-Kendall. Fonte: Elaborado pelo autor. 33

Figura 15. Composições de valores de anomalia observados para **a.** Temperatura máxima 2m (°C), **b.** Precipitação (mm), **c.** e **d.** Altura Geopotencial a 200hPa e 500hPa (gpm), respectivamente, e componentes de vento U e V a 10m (m/s), **e.** Altura Geopotencial a 200hPa (gpm), e **f.** Altura Geopotencial a 500 hPa (gpm) e componentes de vento U e V 10m (m/s) em dias de eventos de OC registrados durante o verão austral (DJF) para a cidade de Porto Alegre/RS. Fonte: Elaborado pelo autor. 35

Figura 16. Mesmo que Figura 15, para a cidade de Florianópolis/SC. 36

Figura 17. Mesmo que Figura 15, para a cidade de Curitiba/PR. 37

Figura 18. Mesmo que Figura 15, para a cidade de Maringá/PR. 38

Figura 19. Mesmo que Figura 15, para a cidade de São Paulo/SP. 39

Figura 20. Mesmo que Figura 15, para a cidade de São José do Rio Preto/SP. 40

Figura 21. Mesmo que Figura 15, para o evento de OC massivo do verão de 2014 detectado nas cidades de São Paulo, São José do Rio Preto, Curitiba, Maringá, Florianópolis e Porto Alegre (composição feita para os dias 31/01 a 09/02/2014). 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Base de dados utilizada para condução das análises.	19
Tabela 2. Total de dias participantes em evento de OC durante o verão austral para as diferentes cidades analisadas, divididos entre as fases da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.	29
Tabela 3. Número de dias de evento de OC coincidentes durante o verão austral para as diferentes fases da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.	30
Tabela 4. Valores para dias totais e coincidentes de OC contabilizados nos municípios comparados nas diferentes fases da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.	30
Tabela 5. Razão entre o número de dias coincidentes entre os municípios com relação ao número total de dias de OC registrados durante cada fase da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. METODOLOGIA	19
3.1 Dados	19
3.2 Identificação dos eventos de Onda de Calor.....	20
3.2.1 Variação temporal e tendências dos eventos de Onda de Calor	21
3.2.2 Avaliação das condições meteorológicas durante eventos de Onda de Calor	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÕES	42
6. BIBLIOGRAFIA	43

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas afetam substancialmente o planeta e a sociedade, especialmente por aumentar a intensidade e frequência de eventos extremos, tais como ondas de calor, secas e inundações, sendo países subdesenvolvidos e em desenvolvimento os mais afetados por estes dois últimos (TRENBERTH et al., 2007). O aumento de ocorrência de eventos climáticos extremos é considerado um dos efeitos mais perigosos das mudanças climáticas (RUSTICUCCI, 2012).

Muitos estudos sugerem que a forçante climática do aquecimento global antropogênico contribuiu parcialmente para a ocorrência de ondas de calor (OCs) massivas observadas nas última décadas, como as de 2003 e na Europa e 2010 na Rússia (STOTT et al., 2004; DOLE et al., 2011; FISCHER & KNUTTI, 2015). O fator de contribuição humana para este tipo de evento se tornou ainda mais evidente em episódios recentes de OC como a de 2019 na Europa e 2020 na Sibéria, onde foram registrados recordes de temperatura em diversas localidades (VAUTARD et al., 2019; CIAVARELLA et al., 2020). De forma geral, uma OC pode ser compreendida como um período de dias consecutivos com condições de temperatura mais quentes do que o habitual, para uma região e época do ano específicos (PERKINS et al., 2012), embora existam uma série de diferentes definições para o conceito.

Atualmente existem muitos estudos para o Hemisfério Norte e Austrália no Hemisfério Sul caracterizando OCs e avaliando mudanças em seus comportamentos e processos físicos associados (GARCÍA-HERRERA et al., 2010; DOLE et al., 2011; COWAN et al., 2014; PERKINS-KIRKPATRICK & LEWIS, 2020). Porém o mesmo não acontece para a América do Sul e para o Brasil, onde estudos com levantamento de análises similares são ainda latentes e escassos (GEIRINHAS et al., 2017), apesar da região não ser uma exceção à tendência de aumento de temperatura da superfície ao longo das últimas décadas. Estudos prévios demonstraram que o Brasil vem sendo afetado com aumentos nas temperaturas mínimas e máximas desde os anos 1960 (VINCENT et al., 2005; ALEXANDER et al., 2006; SKANSI et al., 2013; SOARES et al., 2017; MARENGO & CAMARGO, 2008).

Estudos conduzidos no Hemisfério Norte demonstraram que em latitudes médias, a origem de eventos de OC é geralmente associada com o estabelecimento de padrões de circulação atmosférica anti-ciclônicos de larga escala (BLACK et al., 2004; DOLE et al., 2011), também chamados de bloqueios atmosféricos (BAs). Esse comportamento pode ser caracterizado por anomalias geopotenciais positivas estacionárias ou quase estacionárias nos níveis de pressão atmosférica de 200 e 500 hPa, que induzem o movimento vertical descendente (*i.e. subsidência*) de massas de ar, levando a condições de céu aberto e consequente aumento da radiação solar forçante em superfície. Esta combinação resulta em ventos superficiais de baixa intensidade, redução de ventos totais e períodos de calor prolongados, sendo associados a eventos extremos de temperatura e também de precipitação (XOPLAKI et al., 2003; MEEHL & TEBALDI, 2004; PFAHL & WERNLI, 2012; STEFANON et al., 2012; RODRIGUES et al., 2019; BUEHLER et al., 2011; SILLMANN et al., 2011). No Hemisfério Sul entretanto essa relação foi pouco investigada, com exceção de alguns poucos estudos (GEIRINHAS et al., 2017; COSTA, 2018; RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017; RODRIGUES et al., 2019), onde mais recentemente foram identificadas e quantificadas correlações entre eventos de BAs com

extremos de temperatura e anomalias negativas de precipitação sobre a região sudeste do Brasil (RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017; RODRIGUES et al., 2019).

Analisando o período histórico de 1979 a 2014, Rodrigues & Woollings (2017) demonstraram que 50 a 80% dos dias de calor extremo no Atlântico Sul Sudoeste e América do Sul Sudeste ocorrem concomitantemente a dias de BA ativos sob a região. Rodrigues *et al.* (2019) por sua vez caracterizaram ondas de calor marinhas (OCMs) no Atlântico Sul Sudoeste, e demonstraram que os mesmos mecanismos físicos associados com o desenvolvimento de OCMs também podem acarretar anomalias positivas de temperatura sobre a superfície terrestre, como no caso do evento de 2013/2014. Entretanto, em nenhum dos estudos foi feita a caracterização desses dias com extremos de temperatura sobre terra, como sendo participantes em eventos de OC sobre o continente.

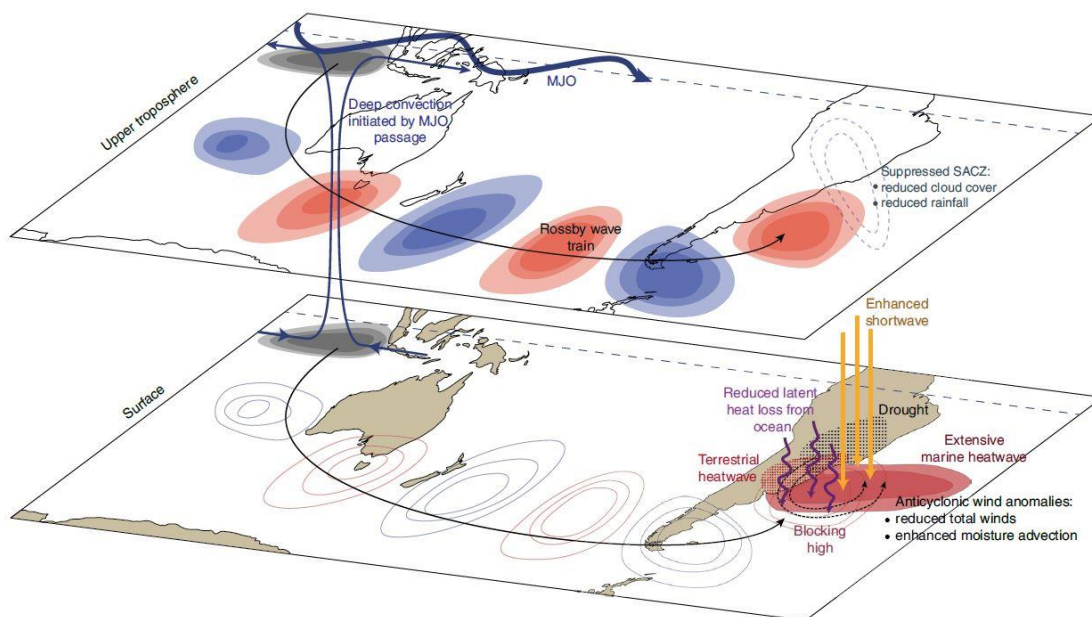
Diferentes estudos que investigaram o evento de seca do verão de 2013/2014 apontaram que o BA ativo durante o período contribuiu para a supressão da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), devido ao sistema de alta pressão deslocado sobre a América do Sul Sudeste (COELHO *et al.*, 2015, 2016; GETIRANA, 2015; OTTO *et al.*, 2015; SETH *et al.*, 2015). Não obstante, Rodrigues & Woollings (2017) demonstraram que anos com número maior de dias de BA coincidem com anos com menos dias de estabelecimento da ZCAS. A ZCAS é definida como uma persistente banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste que se estende desde o sudeste da Amazônia até sudoeste do oceano Atlântico Sul, sendo estabelecida em condições específicas pela convergência de diferentes massas de ar (ANDRADE, 2007; CARVALHO *et al.*, 2002a, 2004; KODAMA, 1992; SATYAMURTI *et al.*, 1998). Sua ocorrência é observada durante o período de estabelecimento do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) entre a primavera e o verão austral, e desempenha um importante papel na distribuição de chuva sobre o sudeste do Brasil (ANDRADE, 2007; DRUMOND, 2005; LOPES, 2016; KOUSKY, 1988).

Carvalho *et al.* (2004) destacam que episódios intensos de precipitação associados à ZCAS, são precedidos pelo avanço de frentes frias nas latitudes médias, um dos padrões de circulação que pode ser suprimido devido à atuação de BAs nesta região (NIETO-FERREIRA *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2019). Concomitantemente à estiagem provocada pelo evento de 2013/2014, a cidade de São Paulo testemunhou um colapso do seu sistema de abastecimento público, com o complexo de reservatórios Cantareira atingindo níveis críticos (COELHO *et al.*, 2016; GETIRANA, 2015; OTTO *et al.*, 2015).

O estudo conduzido por Rodrigues *et al.* (2019) caracterizando o evento de OCM de 2014, associou o BA ativo durante sua ocorrência à uma perturbação atmosférica provocada pela intensificação da atividade convectiva no oceano Índico, na Oceania e no oceano Pacífico Oeste durante a fase ativa da Oscilação Madden-Julian (COELHO *et al.*, 2015; SETH *et al.*, 2015; RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2019).

A Oscilação de Madden-Julian (OMJ) é um modo de variabilidade climática natural cíclico e de frequência intra-sazonal, recorrente a cada 30 a 90 dias. É caracterizada por uma intensificação da atividade convectiva no oceano Índico equatorial, formando uma zona de instabilidade que após atingir seu ápice percorre o globo de oeste para leste, propagando uma forte banda de precipitação provocada pelo processo de convecção profunda (MADDEN & JULIAN, 1972; ZHANG, 2005).

Figura 1. Representação esquemática da influência da MJO no desencadeamento de um trem de ondas de Rossby, responsável pelo bloqueio atmosférico ativo que desencadeou a OCM massiva de 2013/2014. Fonte: (Rodrigues et al., 2019).



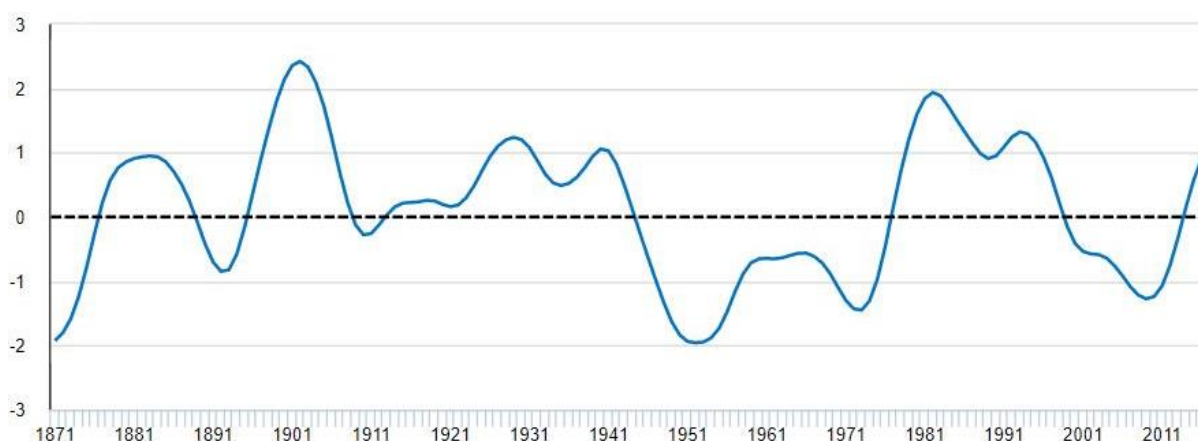
Além da forte correlação entre os dias de BA ativo e dias de OCM para o evento massivo de 2013/2014, Rodrigues *et al.* (2019) demonstraram um fator de correlação de ordem significativa entre o número de dias com bloqueios atmosféricos ativos na América do Sul Sudeste, e os dias ativos da OMJ. Os autores também verificaram que a assinatura do evento de 2014 era semelhante à assinatura média dos eventos de OCM para o período de 1982 a 2016. Rodrigues & Woollings (2017) já haviam demonstrado que durante os meses de DJF para o período de 1979 a 2014, 55% dos dias de BA ativo aconteceram concomitantemente às fases 1 e 2 da OMJ, e outros estudos encontraram evidências que sugerem que a atividade convectiva no oceano Pacífico associada à OMJ é modulada pela Oscilação Interdecadal do Pacífico (LOPEZ *et al.*, 2016; NIEVES *et al.*, 2015).

Rodrigues & Woollings (2017) demonstraram um aumento significativo no número de dias de BA durante os meses de DJF para o período de 2000-2014, quando a OIP entrou em sua fase negativa. A fase negativa da OIP é geralmente associada com o fortalecimento dos ventos alísios sobre o oceano Pacífico, o que leva a um estado semelhante do fenômeno La Niña, com esfriamento das águas superficiais do Pacífico tropical (ENGLAND *et al.*, 2014). Acredita-se que esse mecanismo tende a promover indiretamente um aquecimento nas águas do oceano Índico tropical (LEE *et al.*, 2015) onde a OMJ ocorre. Sabe-se também que a OMJ tende a ocorrer especialmente durante anos neutros ou de fraca manifestações da La Niña (HENDON *et al.* 1999; ZHANG 2005). Conciliando estas informações, Rodrigues & Woollings levantaram a hipótese de que durante o período de fase negativa da OIP (2000 a 2014), com o oceano Pacífico mais frio e o oceano Índico mais quente, a atividade convectiva estaria sendo reforçada no oceano Índico, e suprimida no oceano Pacífico. Desse modo, a OMJ estaria mais ativa, com mais dias nas suas fases 1 e 2, e menos dias na fase 6 e 7, aumentando consideravelmente o número de BAs ativos durante o período de 2000 a 2014, hipótese que pôde ser constatada e

confirmada pelos autores. Entretanto, ainda não foram conduzidos estudos avaliando o comportamento recente destes mecanismos após a mudança da OIP para uma nova fase quente.

O monitoramento da OIP é realizado através de índices construídos a partir de anomalias observadas de TSM, e revelam que a este modo de variabilidade passou por uma fase positiva (quente) de 1977 a 1998, seguida de uma fase negativa (fria) de 1999 a 2014, com outra fase positiva iniciando ao final de 2014 (FOLLAND, 2017).

Figura 2. Histórico de monitoramento da média anual do índice da Oscilação Interdecadal do Pacífico. Fases positivas (negativas) são representadas por índices positivos (negativos). Fonte: (MET OFFICE, 2016).



Modelos de projeção climática de circulação global (GCMs) e regional (RCMs) têm indicado que a probabilidade de ocorrência de longas OCs deve aumentar significativamente nas próximas décadas para a maioria dos cenários climáticos (BARRIOPEDRO et al., 2011; FISCHER & KNUTTI, 2015; OUZEAU et al., 2016), potencializando efeitos já conhecidos como a ocorrência de incêndios florestais e impactando diretamente a saúde humana e dos ecossistemas, e também os recursos hídricos, a agricultura e o setor energético, com prejuízos econômicos significativos associados aos impactos nestes setores produtivos (SILVA et al., 2016; BORCHERS et al., 2020; GOSLING et al., 2009; LINARES & DIAZ, 2008; GARCÍA-HERRERA et al., 2010; BASTOS et al., 2014; AÑEL, et al., 2017; AIVALIOTI, 2015).

Estudos que investigaram impactos de eventos de OC passaram associaram a morte de dezenas de milhares de pessoas a um único evento, a exemplo das OCs de 2003 na Europa e 2010 na Rússia, além de contribuir para a propagação de incêndios de enormes proporções, como no caso do episódio que ficou conhecido como *Black Saturday*, associado com a OC de 2009 na Austrália (DE BONO et al., 2004; REVICH, 2011; MCEVOY et al., 2012).

Para além da perda de vidas, o estresse térmico ambiental provocado pela persistência de temperaturas extremas pode fazer com que as pessoas manifestem sintomas que variam de desidratação, fadiga, náuseas, vômitos, câimbras, dor de cabeça, queda da pressão arterial, tonteira, desmaio e alterações neurológicas.

Dadas as potencialidades de danos ambientais, sociais e econômicos devido à fenômenos de persistência de anomalias positivas de temperatura, existe uma demanda global de compreensão e caracterização de eventos de OC (GEIRINHAS et al., 2017). Conhecer os padrões de comportamento de eventos climáticos extremos como as OCs, bem como as

mudanças esperadas para comportamentos futuros do clima e seus mecanismos associados, é fundamental para aprimorar as ferramentas de previsão de eventos extremos, e dar subsídio a processos de tomada de decisão, planejamento e investimento necessários para adaptação e mitigação destes impactos de forma consistente com os desafios esperados para cada região, minimizando efeitos negativos sobre a saúde humana, dos ecossistemas e a economia.

Diante dos impactos significativos com que eventos extremos de temperatura podem afetar a vida humana e as diferentes esferas da sociedade, e a escassez de estudos descrevendo estes fenômenos na América do Sul, o objetivo dessa pesquisa é caracterizar eventos de OCs na região centro-sul do Brasil durante o período de 1980 a 2019, partir de uma série histórica de dados diários de temperatura máxima, bem como de outras variáveis meteorológicas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar e caracterizar padrões e tendências de comportamento de eventos definidos como OCs ativos na região Centro-Sul do Brasil entre o período de 1980 a 2019.

2.2 Objetivos Específicos

- Fazer a caracterização dos eventos de OC detectados durante o período de estudo através de métricas de Intensidade, Duração e Frequência.
- Identificar e quantificar tendências para as diferentes métricas que caracterizam o comportamento dos eventos de OC detectados.
- Caracterizar as condições atmosféricas observadas durante eventos de OC ocorridos em diferentes municípios da região Centro-Sul do Brasil.

3. METODOLOGIA

3.1 Dados

Os dados utilizados são provenientes de diferentes bases, sendo: temperatura e altura geopotencial disponibilizados pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts/ERA5 Reanalysis* (ECMWF/ERA5); precipitação pelo *Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration* (CPC/NOAA); e ventos U e V pelo *National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy* (NCEP/DOE). O *dataset* ERA5 é uma versão aprimorada do prévio ERA-Interim, e assim como seu antecessor, mantém a característica de combinar de forma otimizada dados de observação e simulações numéricas de estados climáticos passados, provendo uma estimativa dos estados atmosféricos menos sensível a erros observacionais e variabilidade microclimática (DEE et al., 2011).

Ávila-Díaz et al. (2020) avaliaram o desempenho do *dataset* ERA5 em relação a dados observados no Brasil ao longo das últimas 4 décadas, e identificaram valores coerentes para a climatologia e extremos de temperatura na região de estudo, com viés percentual (PBIAS) inferior a 1% e índice padronizado de erro quadrático médio em relação ao desvio padrão dos dados observado (RSR) inferior a 1 (*ad*), para o 90º percentil de temperatura máxima diária (ÁVILA-DÍAZ et al., 2020). Os autores também identificaram que o *dataset* ERA5 tende a subestimar o índice de temperatura máxima diária com viés médio de 5%.

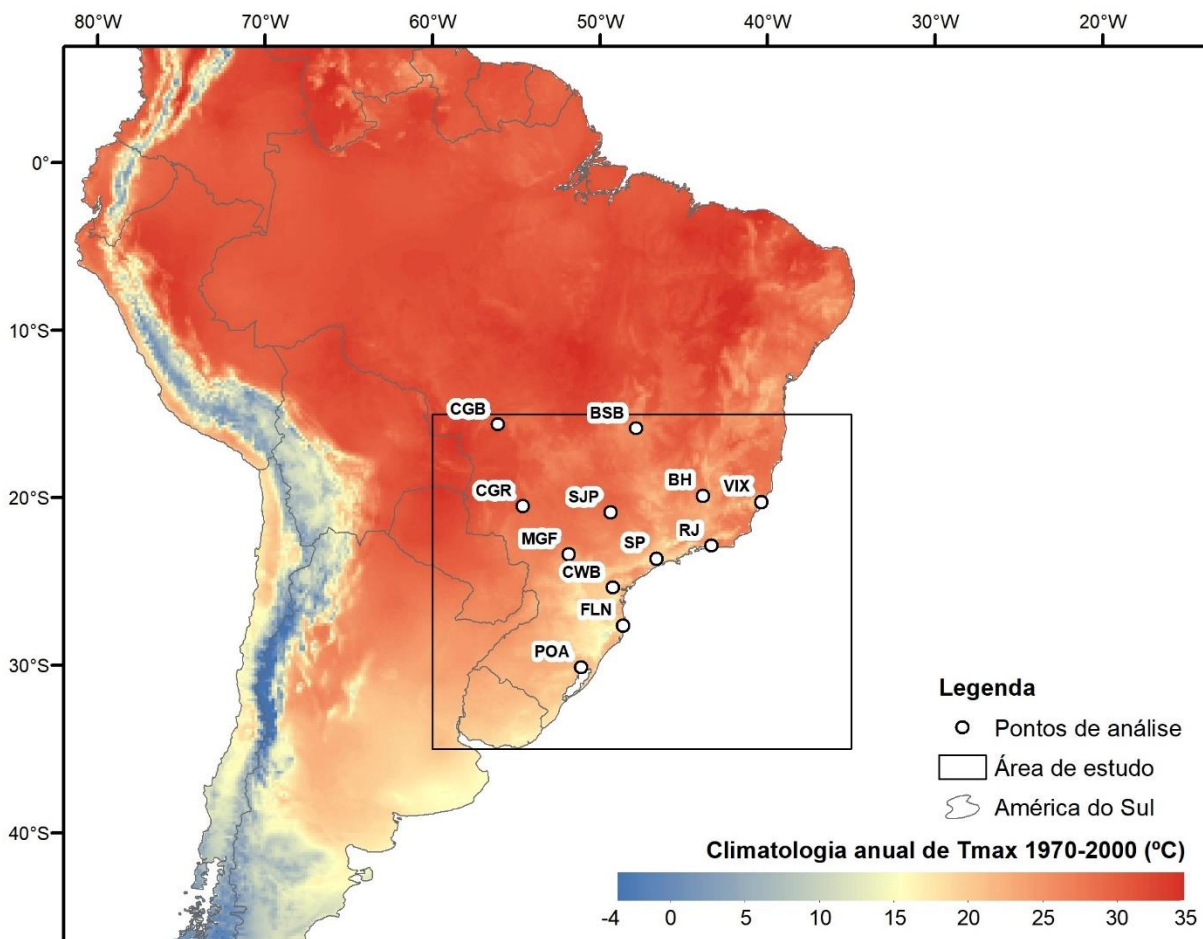
As variáveis atmosféricas utilizadas para gerar os resultados apresentados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1, e foram recortadas entre as latitudes 15°S-35°S e 60°W-35°W para representação das condições meteorológicas regionais durante eventos. A definição da área restrita à este recorte se deu por conta de limitações computacionais de processamento, e do tamanho permitido para obtenção de dados horários fornecidos pelo ERA5 de forma conjunta. Para representação dos fenômenos em larga escala foram feitos recortes revelando as condições para todo o Hemisfério Sul. Na Figura 3 são apresentadas informações a respeito da região de estudo. As análises para caracterização das condições meteorológicas durante OCs foram feitas para eventos observados em 12 diferentes municípios da região centro-sul do Brasil. Os critérios utilizados para escolha destes foram sua distribuição espacial e densidade populacional.

Tabela 1. Base de dados utilizada para condução das análises.

Dado	Altura/Nível	Fonte	Resolução Espacial	Resolução Temporal
Temperatura Máxima	2 metros	ERA5	0.25°x0.25°	Horária
Altura Geopotencial	200 hPa, 500 hPa	ERA5	0.25°x0.25°	Horária
Precipitação	Solo	CPC/NOAA	0.50°x0.50°	Diária
Vento-U	10 metros	NCEP/DOE-2	2.50°x2.50°	Diária
Vento-V	10 metros	NCEP/DOE-2	2.50°x2.50°	Diária

Para as variáveis de Tmax e Altura Geopotencial foram calculados valores diários a partir dos valores horários disponibilizados pelo ERA 5.

Figura 3. Mapa de localização da região de estudo. Pontos brancos indicam os municípios onde foram conduzidas as análises: Florianópolis/SC (FLN), Curitiba/PR (CWB), Porto Alegre/RS (POA), São Paulo/SP (SP), Rio de Janeiro/RJ (RJ), Belo Horizonte/MG (BH), Brasília/DF (BSB), Vitória/ES (VIX), Campo Grande/MS (CGR), Cuiabá/MT (CGB), São José do Rio Preto/SP (SJP) e Maringá/PR (MGF). Fonte: Elaborado pelo autor, dados obtidos de FICK & HIJMANS (2017).



3.2 Identificação dos eventos de Onda de Calor

A construção de índices para avaliação e classificação de eventos de onda de calor pode ser feita de maneiras diversas, de acordo com a atividade sobre a qual se deseja mensurar o impacto de possíveis eventos (saúde, agricultura, propensão a incêndio). Alguns índices são construídos a partir de limiares de temperatura absolutos, porém estes podem não ser adequados para avaliar o comportamento de eventos em determinadas regiões (PERKINS, 2011). Áreas com grande extensão territorial e conseqüentemente alta variabilidade climática como o Brasil, podem possuir grande variabilidade nos valores de referência para temperaturas extremas.

Uma alternativa aos índices absolutos de temperatura é usar limiares baseados em percentis amostrais, que identificam como onda de calor uma sucessão de dias que excedem um limiar de temperatura relativo à climatologia de uma determinada região, ao invés de um valor universal. Em particular esses métodos baseados em percentil permitem uma comparação mais robusta de resultados entre diferentes regiões, e seu uso pode ser mais adequado em um contexto de mudanças climáticas (GEIRINHAS et al., 2017).

Desse modo a metodologia adotada para detecção das OCs é a mesma apresentada por Perkins & Alexander (2013) pela nomenclatura CTX90, onde os eventos são caracterizados por pelo menos 3 dias consecutivos de Tmax acima do 90º percentil para o respectivo dia do calendário. O conjunto de valores utilizado para definição do percentil-limiar em cada um dos dias do ano, é definido utilizando uma janela móvel de 15 dias, centrada no dia em questão e atravessando todo o período de 1980 a 2019. Após a detecção dos eventos são avaliadas as características das OCs para cada ano através das propriedades de Intensidade, Duração e Frequência. A Frequência é definida como o número de eventos de OC observados, a Intensidade é a diferença de temperatura observada em relação à climatologia, sendo a Intensidade Média (Máxima) calculada como a média das intensidades médias (máximas) para cada um dos eventos, e Duração a média do número de dias de cada evento. Estas propriedades inicialmente foram calculadas considerando todo o calendário anual e posteriormente foram calculadas apenas para o período do verão austral: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF).

3.2.1 Variação temporal e tendências dos eventos de Onda de Calor

Para avaliar o comportamento dos eventos ao longo do tempo, foram geradas séries históricas dos valores médios anuais para cada uma das métricas, onde a presença ou não de tendência foi verificada através de uma função de regressão linear simples usando o método dos mínimos quadrados:

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i \quad (1)$$

Onde \hat{y}_i é o valor estimado para a métrica de interesse no ano x de índice respectivo i na série temporal, e as variáveis α e β são os coeficientes lineares independente e dependente, respectivamente, calculados através das fórmulas:

$$\beta = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \sum_{i=1}^n (x_i) \sum_{i=1}^n (y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i) - \beta \sum_{i=1}^n (x_i)}{n} \quad (3)$$

Onde n é o comprimento da série de dados (*para o período de 1980 a 2019, $n = 40$*), y_i é o valor da métrica para o ano x_i . A declividade da reta descrita pela equação (1) determina o sinal e a magnitude da tendência.

Para avaliar a significância estatística das tendências foi utilizado o teste o Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). Trata-se de um teste estatístico não-paramétrico (*i.e., que não exige distribuição normal do conjunto de dados*), que analisa a diferença de sinal entre pontos prévios e subsequentes de uma série de valores, como forma de detectar a presença de tendência monotônica (*i.e., de uma única direção*) a partir da classificação de postos. Cada valor é comparado com um valor precedente na série o que resulta em um total de pares:

$$p = \frac{n(n-1)}{2} \quad (4)$$

Onde p é o total de pares possíveis para análise, e n é o comprimento da série de dados. Matematicamente, o sinal resultante do conjunto total de pares é calculado pela equação:

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (5)$$

Sendo x_i e x_j valores sequenciais de uma série de dados X , e sgn o sinal unitário para cada par analisado, definido como:

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j > x_i \\ 0, & \text{se } x_j = x_i \\ -1, & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (6)$$

Um valor positivo muito alto de s indica presença de tendência crescente, e um valor negativo muito baixo de s indica presença decrescente. A hipótese nula do teste H_0 entretanto é de que não há tendência na série, e a hipótese alternativa H_a é de que há tendência. Para a formulação da hipótese nula assume-se que os dados coletados ao longo do tempo são independentes e identicamente distribuídos, de modo que para $n \geq 10$ espera-se distribuição normal para s , com média igual a zero e variância igual a:

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (7)$$

Onde m é número de grupos de valores repetidos na série de dados, e t_i é o número de valores repetidos no grupo i . O teste estatístico normalizado Z então é calculado através da fórmula:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & \text{se } s > 0 \\ 0, & \text{se } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & \text{se } s < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Com o valor de Z calculado é possível testar a validade da hipótese nula H_0 contra a hipótese alternativa H_a , sendo necessário para isso definir o nível de aceitação da probabilidade de falsa rejeição de H_0 (erro tipo I), representado por α e geralmente adotado como sendo 0.01, 0.05 ou 0.1, representando um intervalo de confiança estatístico de 99%, 95% ou 90%, respectivamente.

A hipótese nula H_0 portanto é rejeitada e H_a é aceita para um intervalo de confiança estatístico de $100(1-\alpha)\%$ se $|Z_{MK}| \geq Z_{1-\alpha/2}$, onde $Z_{1-\alpha/2}$ é o $100(1-\alpha/2)^{\text{º}}$ percentil da distribuição normal padronizada. O valor de $Z_{1-\alpha}$ pode ser encontrado em tabelas de diferentes livros de estatística ou calculado através de funções disponibilizadas por *softwares*. Tendo sido verificado e validado esse requisito, têm-se que a série de dados X apresenta tendência significativa para o intervalo de confiança estabelecido, com sinal crescente caso $Z_{MK} > 0$, e decrescente caso $Z_{MK} < 0$.

3.2.2 Avaliação das condições meteorológicas durante eventos de Onda de Calor

Para traçar um panorama das condições particulares dos eventos em cada local de análise, foram feitas composições de anomalia para cada uma das variáveis apresentadas. A mesma forma que para a temperatura, as anomalias para as demais variáveis são calculadas subtraindo a climatologia média dos valores diários, e as composições são calculadas fazendo a média dos valores de anomalia observados nos dias identificados como sendo de evento de OC. Dessa forma é possível observar as condições atmosféricas destoantes em relação à climatologia média, que acompanham e/ou caracterizam os eventos detectados como sendo de OC. Para isto foram avaliadas anomalias para variáveis apresentadas na Tabela 2: a) Temperatura, b) Precipitação c) Altura Geopotencial, d) Vento.

Embora valores de Pressão Média no Nível do Mar (PMNM) tenham sido utilizados para caracterização de eventos de OC em outros estudos (RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017; GEIRINHAS et al., 2017), neste trabalho a variável não foi considerada para traçar a assinatura dos eventos pois Rodrigues & Woollings (2017) demonstraram que a correlação entre PMNM com eventos de BA/OC sobre terra não são estatisticamente significativos. Isso é explicado pelo fato de que o aquecimento próximo à superfície pode gerar zonas de baixa termal, com circulações ciclônicas que se opõem à circulação de larga-escala em altos níveis (FISCHER et al., 2007). Por esse motivo Pfahl & Wernli (2012) também sugerem que a identificação de bloqueios nas altitudes médias e altas é um melhor preditor de extremos de temperatura e precipitação na superfície, justificando a utilização exclusiva da altura geopotencial para essa caracterização.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que as cidades de Florianópolis, Curitiba, Porto Alegre e São Paulo tiveram o evento do verão de 2014 como sendo o maior da série histórica (Figuras 4 e 5). Rio de Janeiro e Belo Horizonte apresentam eventos de maior duração em períodos divergentes, tanto para o período anual (2016 para o Rio de Janeiro; 2007 e 2015 para Belo Horizonte) quanto para o verão (2003 para o Rio de Janeiro, 2015 para Belo Horizonte). O evento de 2014 também aparece como sendo o de maior duração registrado durante o verão para as cidades de São José do Rio Preto e Maringá (Figura 7), embora para o período anual ambas as cidades tenham tido em 2016 o evento de duração recorde.

As cidades de Brasília, Vitória, Campo Grande e Cuiabá, por sua vez, tiveram seus eventos de maior duração registrados em outros anos (Figuras 5 a 7), e com datas divergentes entre si quanto comparadas umas com as outras tanto para o período anual (2016, 2001, 2005/2007/2016 e 2012, respectivamente), com exceção de Brasília e Campo Grande que coincidem com um grande evento em 2016, embora sejam completamente divergentes quando a avaliação é feita para o período de verão (2015, 2001, 2005 e 2016, respectivamente). No verão de 2016, um evento de El Niño forte se desenvolveu no Pacífico. Devido a sua extensão espacial enorme, eventos de El Niño são capazes de aumentar a temperatura média global. Além disso, a principal teleconexão entre o El Niño e a América do Sul é um trem de ondas de Rossby estacionária que coloca uma circulação anti-ciclônica sobre o sudeste do Brasil, similar ao BA (CAI et al. 2020).

Figura 4. Evolução temporal dos eventos de OC registrados para as cidades de Florianópolis, Curitiba, Porto Alegre. Figuras na linha superior (inferior) representam eventos durante todo o ano (durante o verão austral). Cada evento é representado por uma barra, barras vermelhas indicam o evento de maior duração para cada cidade (em caso de empate é destacado o primeiro evento de maior duração). Eixo horizontal superior representa o acumulado de eventos. Fonte: Elaborado pelo autor.

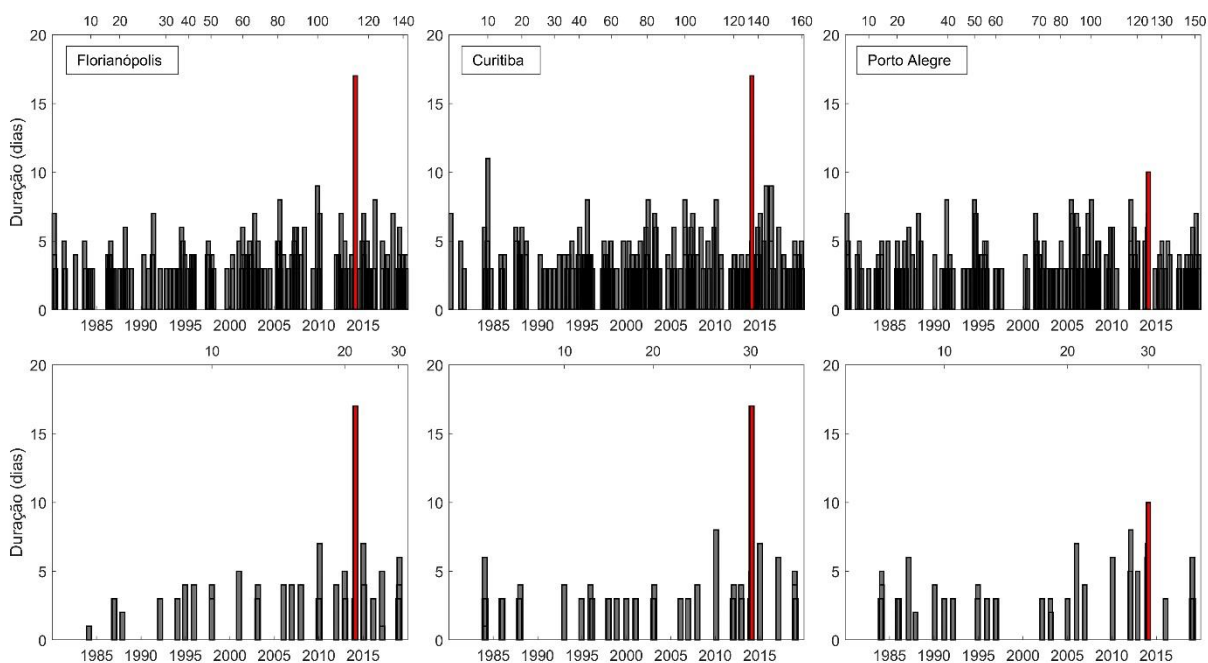


Figura 5. Mesmo que Figura 4, para as cidades de São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Belo Horizonte (BH). Fonte: Elaborado pelo autor.

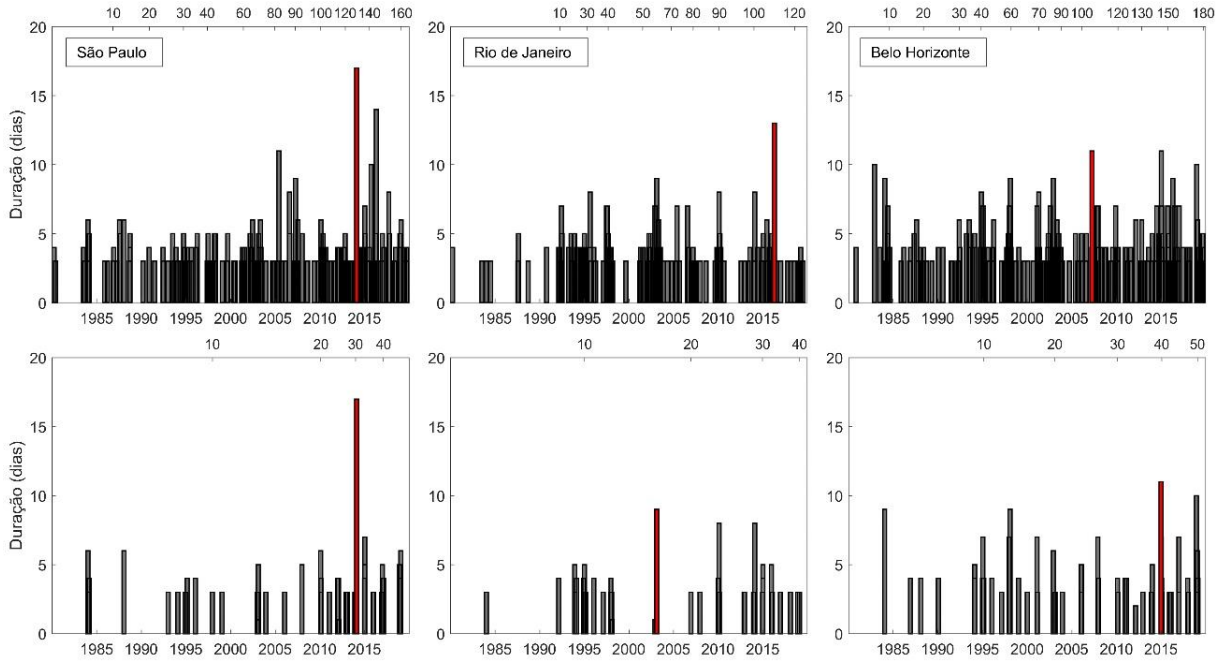


Figura 6. Mesmo que Figura 4, para as cidades de Brasília (BSB), Vitória (VIX) e Campo Grande (CGR). Fonte: Elaborado pelo autor.

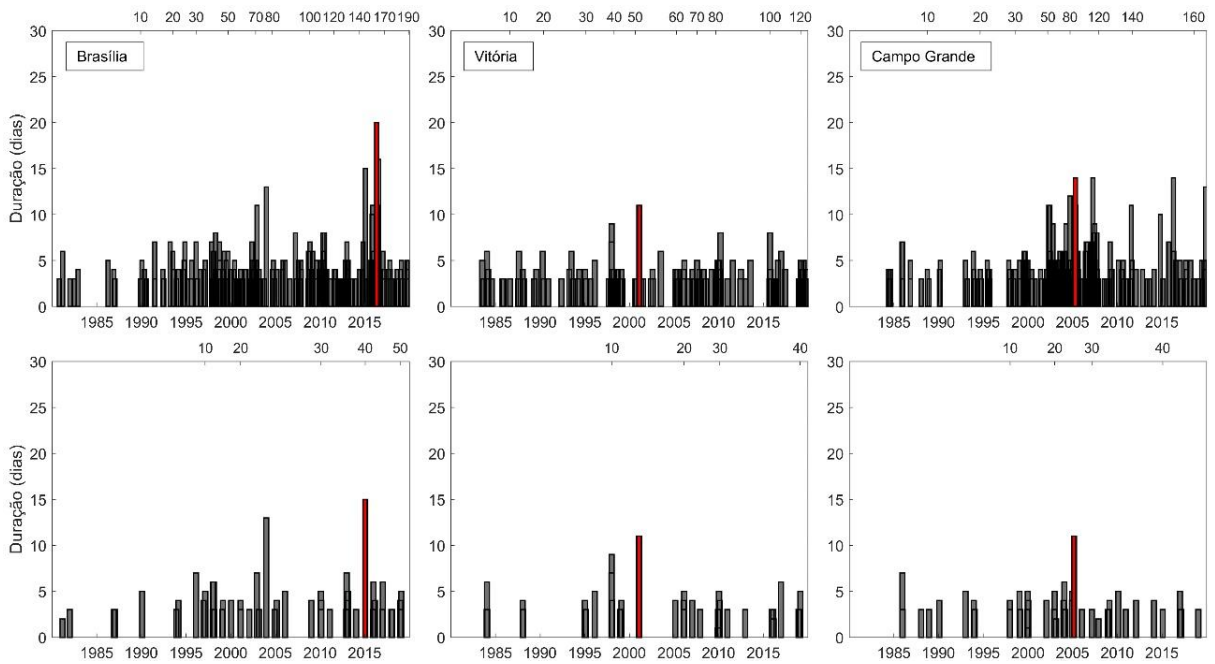
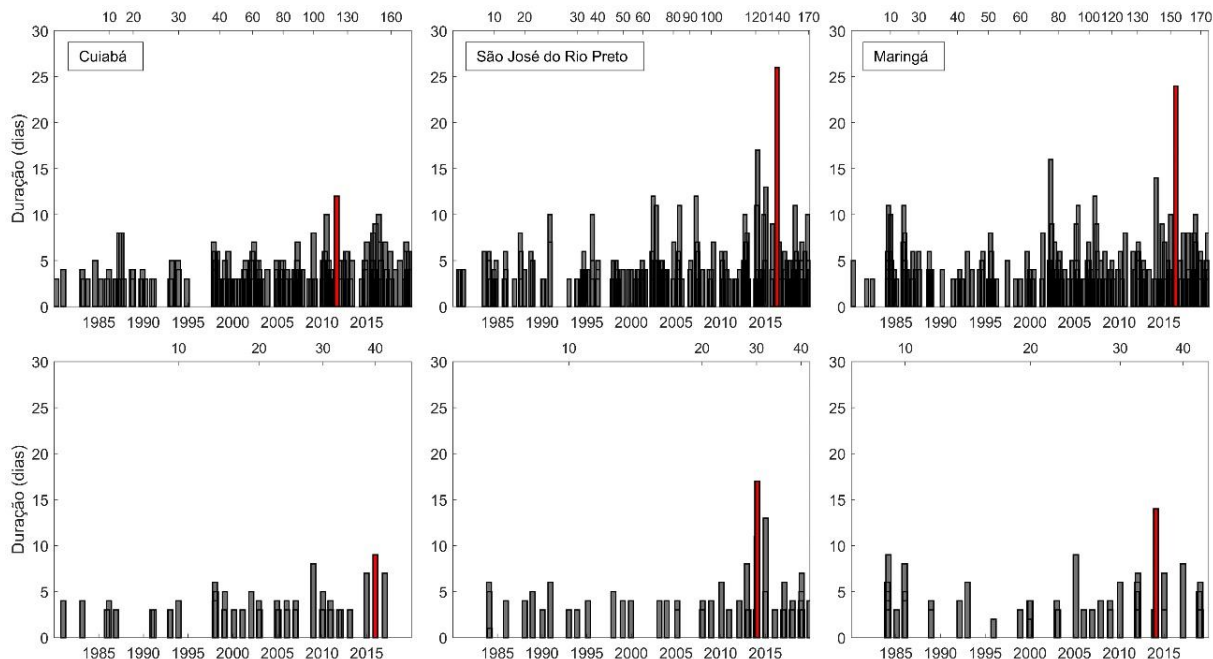


Figura 7. Mesmo que Figura 4, para as cidades de Cuiabá (CGB), São José do Rio Preto (SJP) e Maringá (MGF). Fonte: Elaborado pelo autor.



A diferenciação entre eventos ocorridos ao longo de todo o ano e apenas durante o verão é feita pois sabe-se que as condições que causam dias sucessivos de temperatura extrema são diferentes entre as diferentes estações do ano, como bloqueios atmosféricos de alta pressão/quebra de ondas de Rossby no verão, e advecção polar de ar quente durante o inverno (PERKINS & ALEXANDER, 2013). A isso soma-se o fato de que os impactos na saúde humana tendem a ser maiores durante eventos ocasionados no verão (PERKINS & ALEXANDER, 2013), devido as maiores temperaturas características da estação.

Complementarmente à evolução temporal de duração dos eventos, foram plotadas também as séries de dias totais participantes em OC para cada um dos municípios, apresentando um panorama da frequência de dias de OC tanto para o ano todo quanto para o verão (Figuras 8-11). Várias cidades também apresentaram número máximo de dias de OC em 2014 principalmente no verão, como para Florianópolis, Curitiba, Porto Alegre, São Paulo e São José do Rio Preto. Além disso, várias cidades apresentaram frequência máxima de OC no verão de 2015, como Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. Este ano também apresentou um número grande de BAs no sudeste do Brasil (RODRIGUES et al., 2019).

Ao longo do período avaliado é possível notar aumentos de magnitude significativa tanto para o número de dias totais observados por município (Tabela 2, Figuras 8 a 11) quanto para o número de dias coincidentes de OC entre municípios diferentes (Tabela 3) para o período de 2000–2014 (fase negativa OIP) em relação ao período de 1980–1999 (fase positiva OIP). Esse comportamento é esperado, sabendo-se do efeito de modulação da OIP sobre a OMJ, e a relação desta com o estabelecimento de BAs (RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017). A tendência de aumento no número de dias participantes em OC por município, entretanto, se manteve mesmo após a entrada da fase positiva seguinte da OIP (2015–2019). Os municípios analisados apresentaram aumento de 60% a 350% para o número de dias por ano para a atual fase positiva da OIP em relação a fase de mesmo sinal em 1980–1999 (Tabela 2). Mesmo

quando comparados com os valores para a fase negativa de 2000–2014, todos os municípios, com exceção de Porto Alegre, ainda registram aumentos relativos no número de dias por ano.

Figura 8. Número de dias participantes em eventos de OC para as cidades de Florianópolis (FLN), Curitiba (CWB) e Porto Alegre (POA). Figuras na linha superior (inferior) representam eventos durante todo o ano (durante o verão austral). Uma linha tracejada azul marca a transição da OIP para sua fase negativa (fria), coincidentemente separando a série temporal entre primeira e segunda metade. A linha tracejada vermelha marca a transição da fase negativa da OIP para uma nova fase positiva (quente). Fonte: Elaborado pelo autor.

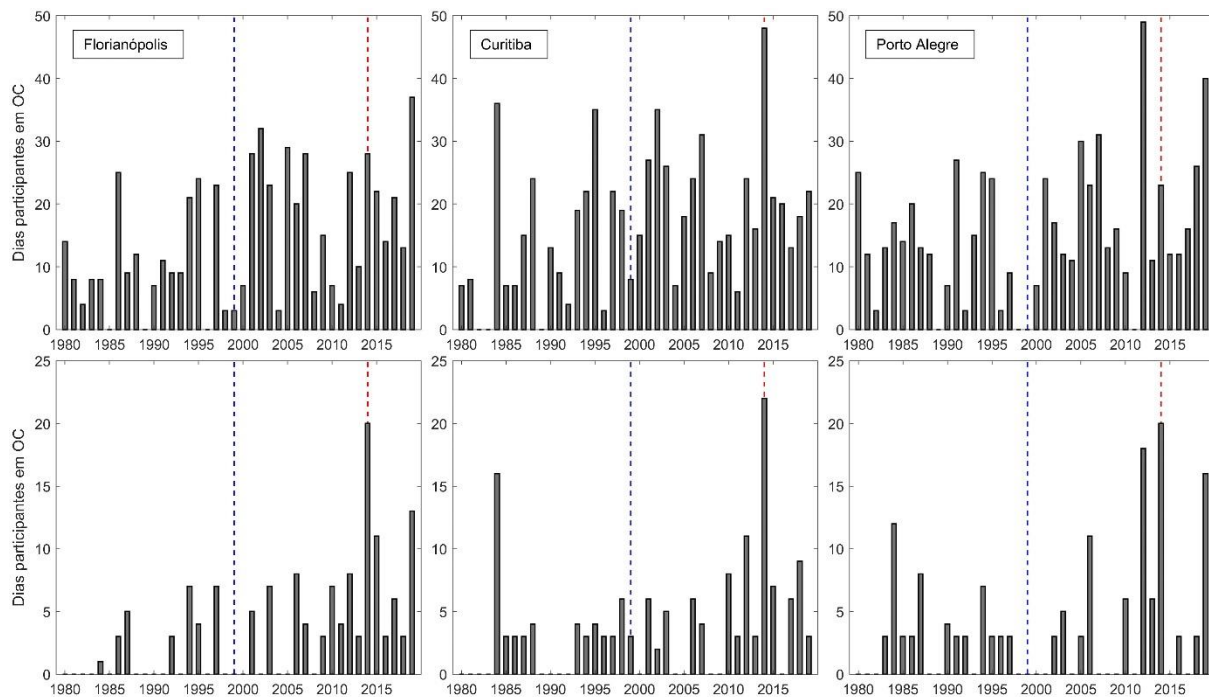


Figura 9. Mesmo que Figura 8, para as cidades de São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), e Belo Horizonte (BH). Fonte: Elaborado pelo autor.

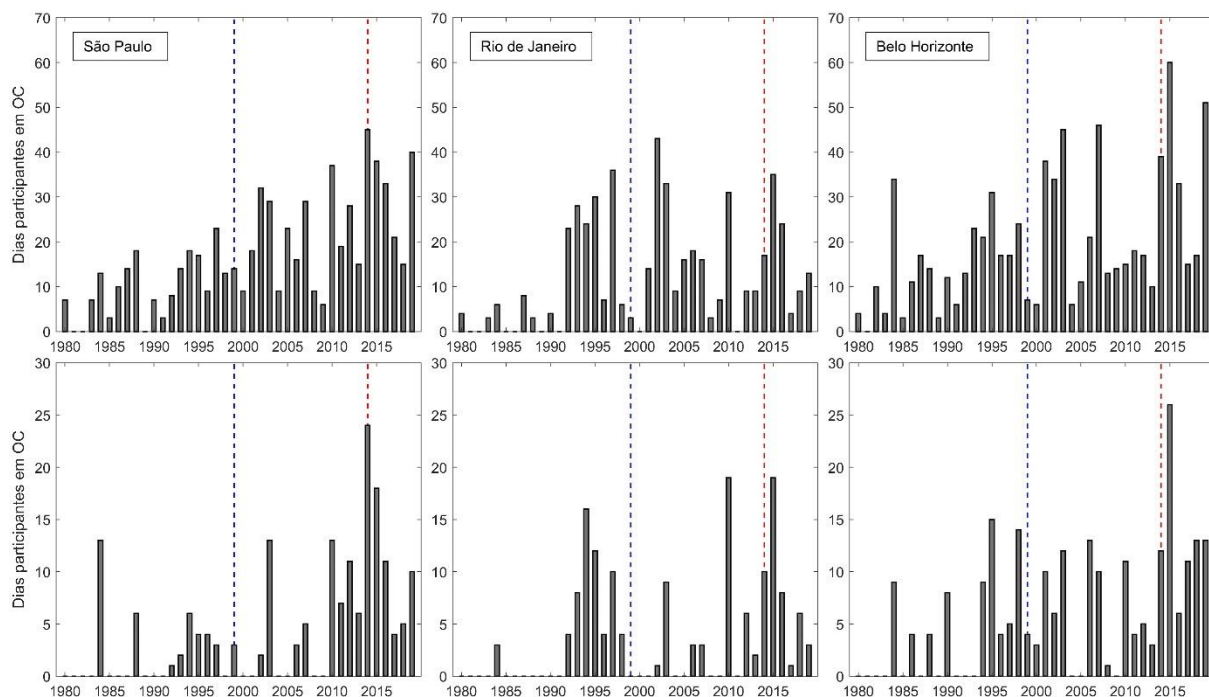


Figura 10. Mesmo que Figura 8, para as cidades de Brasília (BSB), Vitória (VIX) e Campo Grande (CGR). Fonte: Elaborado pelo autor.

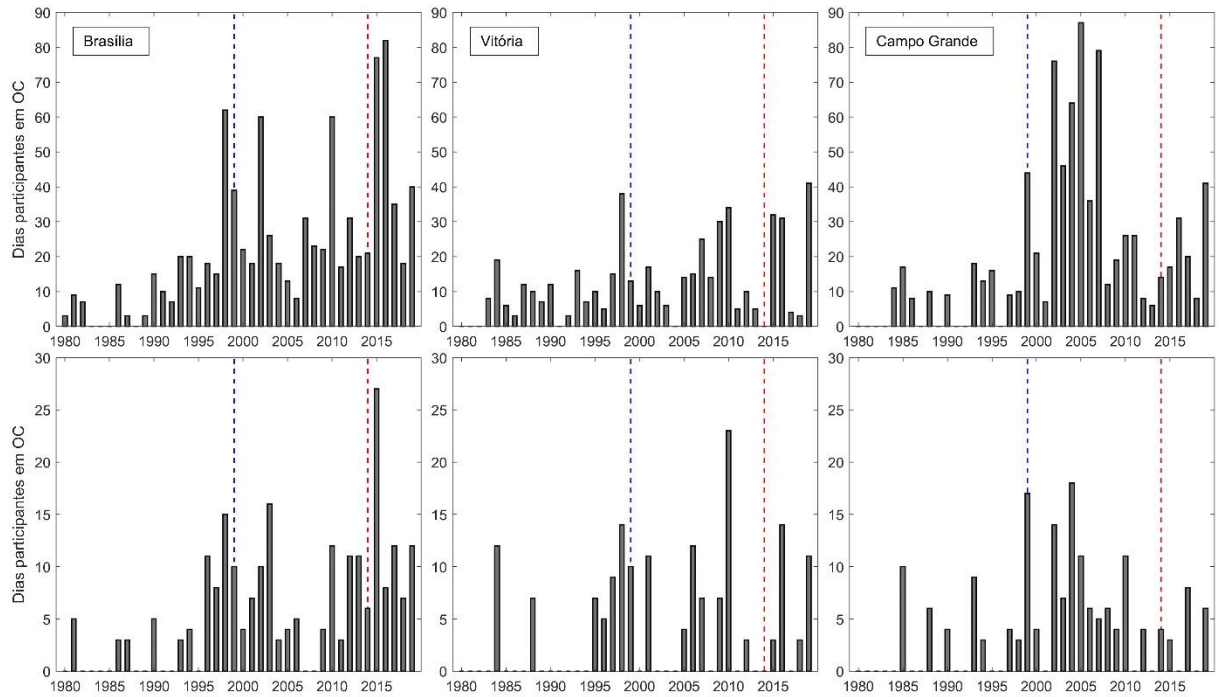


Figura 11. Mesmo que Figura 8, para as cidades de Cuiabá (CGB), São José do Rio Preto (SJP) e Maringá (MGF). Fonte: Elaborado pelo autor.

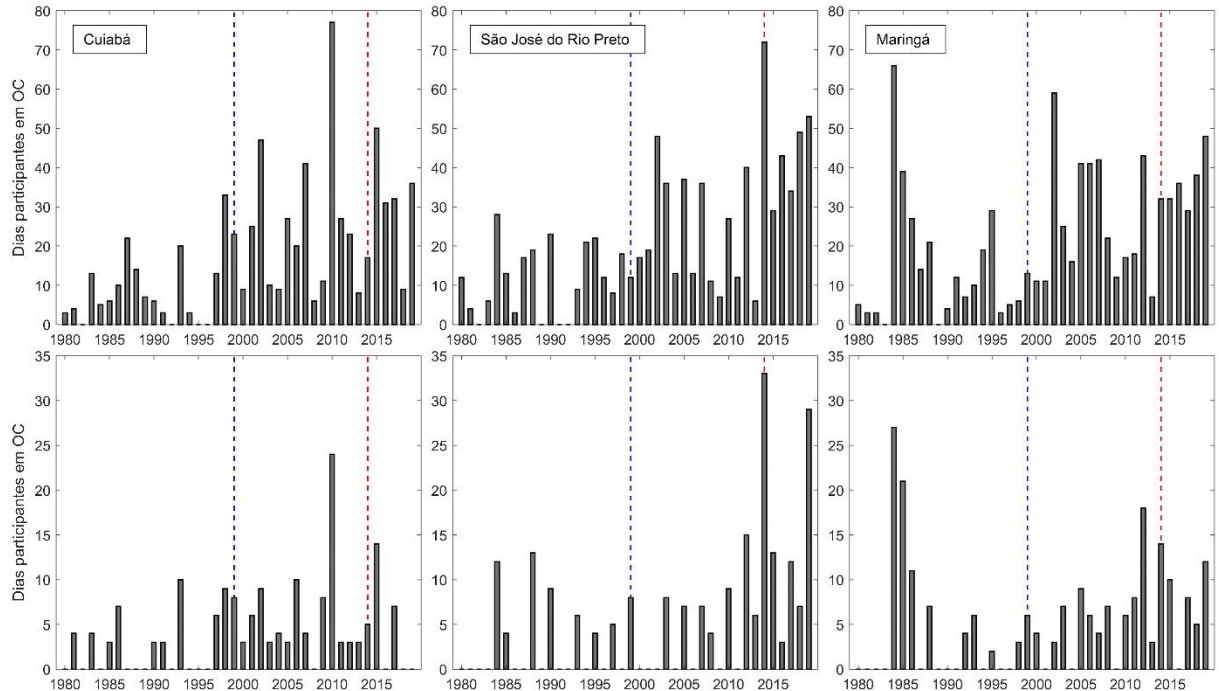


Tabela 2. Total de dias participantes em evento de OC durante o verão austral para as diferentes cidades analisadas, divididos entre as fases da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.

Cidade	Total de dias (DJF) participantes em OC					
	1980-1999 (OIP positiva)		2000-2014 (OIP negativa)		2015-2019 (OIP positiva)	
Florianópolis	30	1,50 dias/verão	69	4,60 dias/verão	36	7,20 dias/verão
Curitiba	55	2,75 dias/verão	70	4,67 dias/verão	25	5,00 dias/verão
São Paulo	42	2,10 dias/verão	84	5,60 dias/verão	48	9,60 dias/verão
Porto Alegre	55	2,75 dias/verão	72	4,80 dias/verão	22	4,40 dias/verão
Maringá	87	4,35 dias/verão	89	5,93 dias/verão	35	7,00 dias/verão
São José do Rio Preto	61	3,05 dias/verão	89	5,93 dias/verão	64	12,80 dias/verão

Esse padrão também é observado para o número de dias coincidentes entre os municípios comparados (Figura 12, Tabela 3). Todos os municípios apresentaram aumentos relativos que vão de 75% a 475%, quando comparada a fase quente atual com a fase quente passada da OIP. Da mesma forma, com exceção das comparações entre CWB vs. FLN e FLN vs. POA, que apresentaram diminuição no número de dias coincidentes por ano para a fase quente atual (2015–2019) em relação a fase fria (2000–2014) como esperado, os demais municípios comparados apresentaram tendências de aumento com magnitudes de aproximadamente 18% a 74%.

Figura 12. Comparação de dias de OC coincidentes entre diferentes municípios, identificados separadamente em cada gráfico. Uma linha tracejada azul marca a transição da OIP para sua fase negativa (fria), coincidentemente separando a série temporal entre primeira e segunda metade. A linha tracejada vermelha marca a transição da fase negativa da OIP para uma nova fase positiva (quente). Fonte: Elaborado pelo autor.

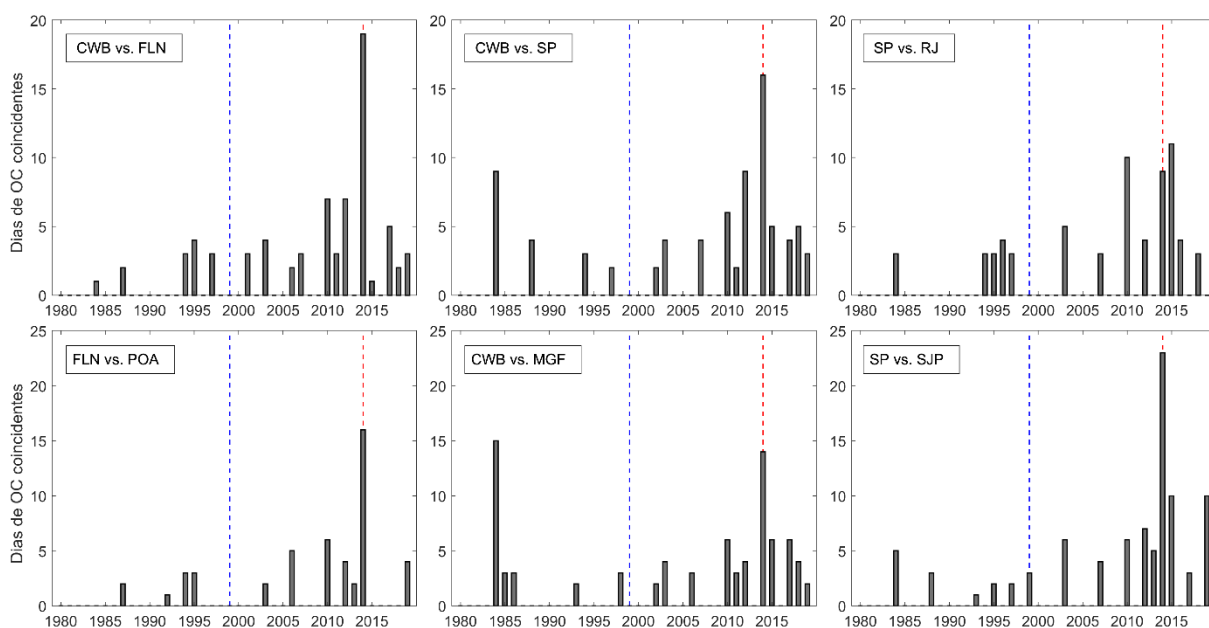


Tabela 3. Número de dias de evento de OC coincidentes durante o verão austral para as diferentes fases da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.

Cidades Comparadas	Total de dias participantes em OC coincidentes					
	1980–1999 (OIP positiva)		2000–2014 (OIP negativa)		2015–2019 (OIP positiva)	
CWB vs. FLN	13	0,65 dias/verão	48	3,20 dias/verão	11	2,20 dias/verão
FLN vs. POA	9	0,45 dias/verão	35	2,33 dias/verão	4	0,80 dias/verão
CWB vs. SP	18	0,90 dias/verão	43	2,87 dias/verão	17	3,40 dias/verão
CWB vs. MGF	26	1,30 dias/verão	36	2,40 dias/verão	18	3,60 dias/verão
SP vs. RJ	16	0,80 dias/verão	31	2,07 dias/verão	18	3,60 dias/verão
SP vs. SJP	16	0,80 dias/verão	51	3,40 dias/verão	23	4,60 dias/verão

Portanto, apesar da influência significativa do efeito modulatório da OIP sobre a OMJ na frequência de eventos de BA e temperaturas extremas, como demonstrado por Rodrigues & Woollings (2017), esse mecanismo por si só parece não explicar completamente a tendência de aumento observada no número de dias participantes eventos de OC para cada cidade, e nem para o número dias coincidentes entre as cidades comparadas. O efeito do aquecimento global deve ser um fator determinante, mas para confirmar essa hipótese um estudo de atribuição teria que ser feito nos moldes do *World Weather Attribution Project* (<https://www.worldweatherattribution.org/>).

Por outro lado, o aumento no número de dias coincidentes de eventos de OC entre as diferentes cidades parece também não ser explicado unicamente pela tendência de aumento do número de dias totais, uma vez que a razão entre o número de dias coincidentes e totais entre os diferentes municípios comparados, com exceção da comparação entre CWB vs. FLN, apresentou valores crescentes em relação ao período de 1980–1999 tanto para o período de fase negativa da OIP (2000–2014) quanto para a fase positiva atual (2015–2019), como apresentado nas Tabelas 4 e 5. Isso sugere que o aumento do número de dias coincidentes entre as cidades analisadas, pode estar relacionada a um crescimento da extensão espacial dos eventos, entretanto uma análise espacial quantitativa e mais minuciosa é necessária para verificar essa hipótese de forma empírica, bem como para buscar possíveis atribuições de causa.

Tabela 4. Valores para dias totais e coincidentes de OC contabilizados nos municípios comparados nas diferentes fases da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.

Cidades Comparadas	1980–1999 (OIP positiva)		2000–2014 (OIP negativa)		2015–2019 (OIP positiva)	
	Dias totais	Coincidentes	Dias totais	Coincidentes	Dias totais	Coincidentes
CWB vs. FLN	85	13	139	48	61	11
FLN vs. POA	85	9	141	35	58	4
CWB vs. SP	97	18	154	43	73	17
CWB vs. MGF	142	26	159	36	60	18
SP vs. RJ	103	16	137	31	85	18
SP vs. SJP	103	16	173	51	112	23

Tabela 5. Razão entre o número de dias coincidentes entre os municípios com relação ao número total de dias de OC registrados durante cada fase da OIP. Fonte: Elaborado pelo autor.

Cidades Comparadas	Razão entre dias coincidentes e totais*		
	1980–1999 (OIP positiva)	2000–2014 (OIP negativa)	2015–2019 (OIP positiva)
CWB vs. FLN	0,18	0,53	0,22
FLN vs. POA	0,12	0,33	0,07
CWB vs. SP	0,23	0,39	0,30
CWB vs. MGF	0,22	0,29	0,43
SP vs. RJ	0,18	0,29	0,27
SP vs. SJP	0,18	0,42	0,26

*A razão é calculada dividindo o número de dias coincidentes pelo número de dias totais de OC registrados nos municípios comparados. Na divisão o número de dias coincidentes foi descontado do número de dias totais para corrigir a dupla contagem.

Através de uma análise comparativa entre as Figuras 13e e 13h e a Figura 14b, é possível inferir que a tendência de aumento no número de dias de OC é regida principalmente pelo aumento da frequência de eventos, e não pela duração. Observa-se uma tendência generalizada de aumento na frequência dos eventos para quase toda extensão territorial avaliada, com o extremo-norte da região sul e quase toda região sudeste e centro-oeste apresentando valores estatisticamente significativos (Figura 13e).

Na Figura 14 é possível observar espacialmente o número médio de dias totais de evento de OC por verão e as tendências generalizadas de aumento de dias de OC, estatisticamente significativos em praticamente toda a região sudeste, para a maior fração da região centro-oeste, e ao nordeste da região sul.

Já as tendências para intensidade média e máxima dos eventos variam, com tendências negativas não significativas para o sul do estado de Rio Grande do Sul e para todo o estado de Minas Gerais (Figuras 13f e 13g). Pequenas porções de terra ao sul do estado de Mato Grosso do Sul demonstram tendências estatisticamente significativas de redução de aproximadamente -0.5°C por década nas intensidades médias e máximas. O estado de São Paulo por sua vez demonstrou ter os maiores valores de tendência crescente para intensidade média e máxima dos eventos, de 0.5°C e 0.8°C por década, respectivamente, com valores estatisticamente significativos que se estendem desde ao sul até o norte do estado, mais próximos à sua porção sudeste. Tendências significativas de menor magnitude para o aumento da intensidade média e máxima dos eventos também podem ser observadas nas regiões próximas à divisa dos estados de Goiás e Mato Grosso.

Para a métrica de duração são observadas tendências de aumento estatisticamente significativas próximas à porção leste da divisa entre os estados do Paraná e São Paulo, bem como ao extremo oeste de Santa Catarina e noroeste de Rio Grande do Sul, próximos da ordem de 1 dia/evento por década (Figura 13h). Tendências significativas de decréscimo na duração de eventos são observados especialmente na fração sul do estado do Rio de Janeiro e uma pequena porção ao extremo sudeste de Minas Gerais, com magnitude de ordem próxima a -0.5 dias/evento por década.

Figura 13. Primeira linha: figuras **a.**, **b.**, **c.** e **d.**, respectivamente: média das métricas de Frequência, Intensidade Média, Intensidade Máxima e Duração das OCs registradas durante o verão austral (dezembro, janeiro, fevereiro) para o período de 1980 a 2019, com as unidades de **a.** n.º de eventos por verão; **b.** e **c.** °C; e **d.** dias. Segunda linha: valores de tendências decenais estimadas através de regressão linear simples para cada uma das métricas apresentadas na linha 1, com as mesmas unidades para **e.**, **f.**, **g.** e **h.**, respectivamente. Pontilhados indicam tendências significativas para um intervalo de confiança estatístico de 95%, calculadas pelo teste de Mann-Kendall. Fonte: Elaborado pelo autor.

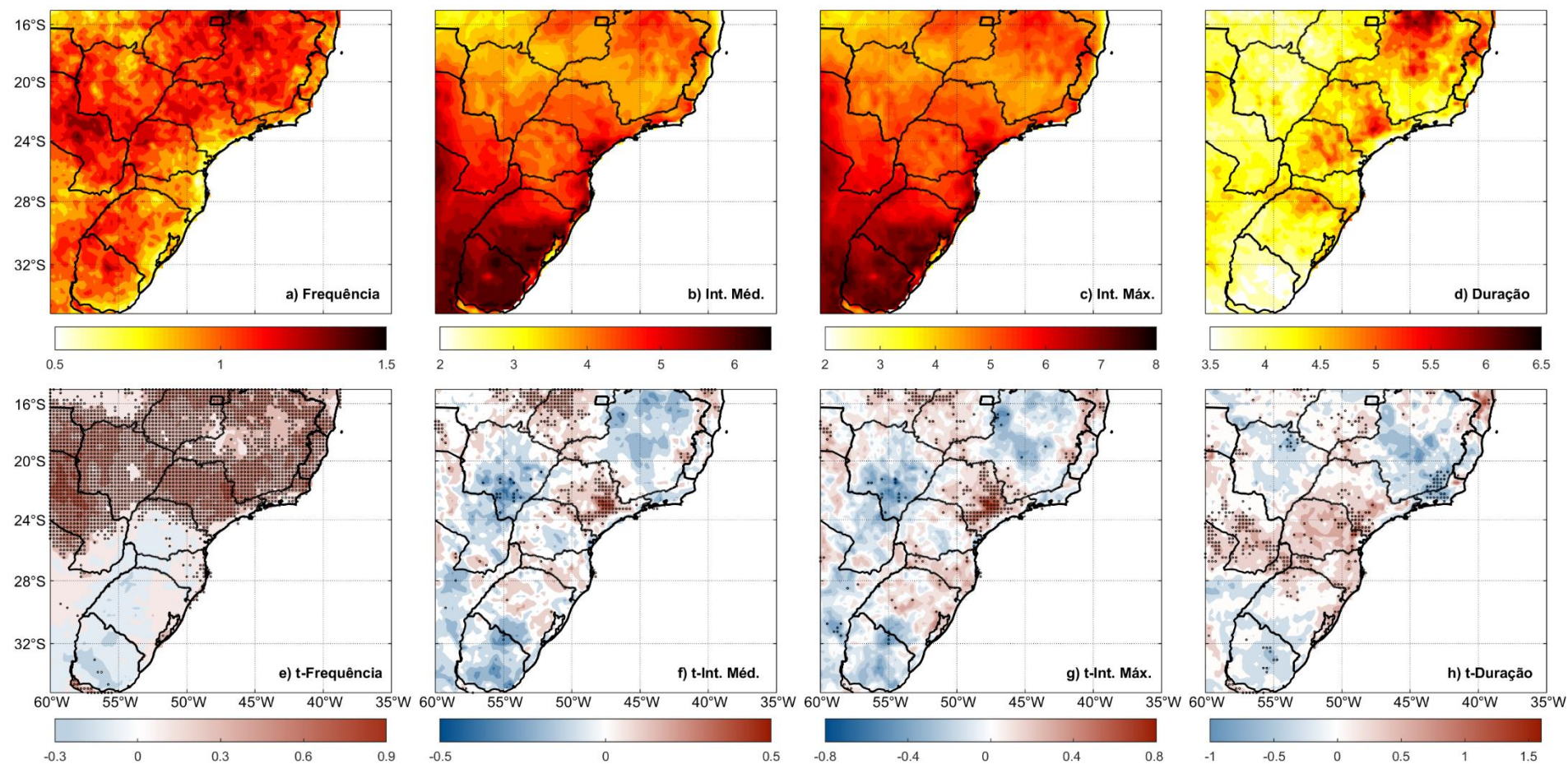
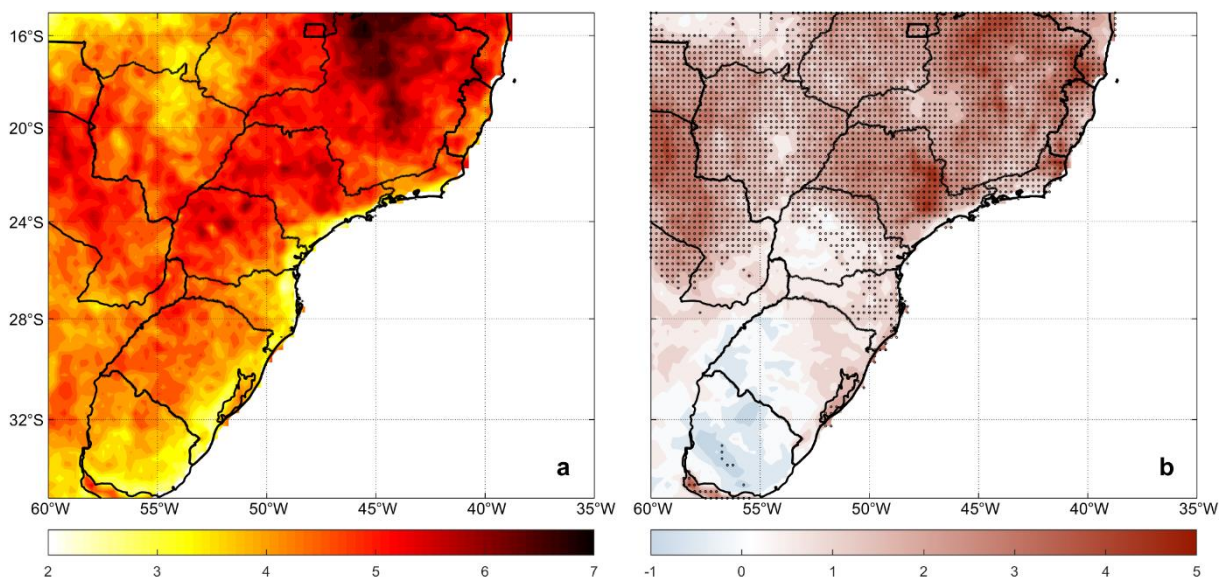


Figura 14. Valores encontrados para a métrica de número total de dias de Onda de Calor por verão. **a.** número médio de dias de OC por verão para o período de 1980-2019, **b.** tendências decenais de aumento/decrécimo no número dias de OC por verão. Pontilhados indicam tendências significativas para um intervalo de confiança estatístico de 95%, calculadas pelo teste de Mann-Kendall. Fonte: Elaborado pelo autor.



A respeito da caracterização meteorológica, é possível observar padrões semelhantes nas assinaturas dos eventos em diferentes municípios, com anomalias geopotenciais positivas deslocadas sobre as regiões onde os eventos de OC são observados, e formações anti-ciclônicas anômalas com o centro ligeiramente deslocado à leste dos pontos de interesse onde foram caracterizados os eventos (Figura 15c-f à Figura 20c-f). Os padrões de anomalia geopotencial a 500 hPa, precipitação e componentes de vento U e V a 10m identificados são semelhantes aos apresentados por Geirinhas *et al.* (2017) para eventos de OC observados durante o verão entre o período de 1979 a 2014, nos municípios contemplados em sua publicação.

Com o permanência destas anomalias em caráter estacionário por períodos prolongados, as condições associadas de céu aberto, aumento da radiação solar forçante e redução de ventos totais decorrentes são fatores que contribuem excesso de calor observados nestas áreas, com eventos de OC podendo ser desencadeados ou intensificados por processos que ocorrem em escalas locais (XOPLAKI *et al.*, 2003; MEEHL & TEBALDI, 2004; PFAHL & WERNLI, 2012; STEFANON *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2019).

Entre as assinaturas dos eventos de OC para as diferentes cidades, outra semelhança marcante são as anomalias de precipitação negativas que se estendem desde a região próxima ao epicentro dos eventos à toda extensão norte do recorte mostrado na Figura 15b à Figura 20b. Essa configuração é semelhante à apresentada por Rodrigues & Woollings (2017) para o evento de 2013/2014, bem como a descrita por Rodrigues *et al.* (2019) para as OCMs detectadas no período de 1982 a 2016.

Isso está relacionado com o padrão de circulação anti-ciclônico detectado nas regiões próximas ao local de ocorrência dos eventos. O BA ativo é responsável pelo impedimento da propagação equatorial de avanço das massas de ar frio, responsáveis pela formação dos sistemas frontais, que contribuiriam para a formação da ZCAS no começo da estação ativa do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS), entre novembro e dezembro (NIETO-FERREIRA *et*

al., 2011; CARVALHO et al., 2004). Durante o verão, a subsidência de massas de ar seco forçada pelo BA ativo, suprime a atividade convectiva responsável pelo aumento de umidade na atmosfera, inibindo também desta forma o estabelecimento da ZCAS (RODRIGUES et al., 2019). Estes dois processos decorrentes da atuação do BA, que é o mecanismo dominante o qual leva à origem dos eventos de OCs, explicam as causas das anomalias negativas de precipitação observadas nestas regiões.

As anomalias de precipitação positivas observadas ao sul dos locais de OC, por sua vez, são provocadas por processos análogos a este mesmo mecanismo. No início da fase ativa do SMAS, ao encontrarem o bloqueio em seu caminho as frentes frias repentinamente cessam de avançar, tornando-se estacionárias ao sul da América do Sul, gerando aumento na precipitação local. Posteriormente, esses índices de precipitação são intensificados em decorrência do fortalecimento do jato de níveis baixos que transporta umidade da Amazônia para o sul (RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017). É possível observar este processo na Figura 17f (30°S, 60°W), onde a presença do jato é mais marcada pela maior intensidade e uniformidade de direção das componentes de vento U e V 10m.

Esse padrão é semelhante ao descrito por Rodrigues *et al.* (2019) para o evento de 2013/2014 (Figura 21), que descrevem o aumento da precipitação nestas regiões também estando associado ao maior transporte de umidade proveniente da Amazônia promovido pelo jato, devido à intensificação dos ventos ao flanco oeste da circulação anti-ciclônica associada ao bloqueio atmosférico ativo. Sánchez-Lugo (2015) demonstrou que as anomalias de precipitação positivas associadas a este comportamento foram responsáveis por ocasionar inundações no Uruguai, na região sul do Brasil e no norte da Argentina. É possível observar também que a posição do bloqueio atmosférico influencia diretamente no local estabelecimento dos eventos e na posição da corrente de jato, conseqüentemente influenciando a distribuição espacial das chuvas.

Figura 15. Composições de valores de anomalia observados para **a.** Temperatura máxima 2m (°C), **b.** Precipitação (mm), **c.** e **d.** Altura Geopotencial a 200hPa e 500hPa (gpm), respectivamente, e componentes de vento U e V a 10m (m/s), **e.** Altura Geopotencial a 200hPa (gpm), e **f.** Altura Geopotencial a 500 hPa (gpm) e componentes de vento U e V 10m (m/s) em dias de eventos de OC registrados durante o verão austral (DJF) para a cidade de Porto Alegre/RS. Fonte: Elaborado pelo autor.

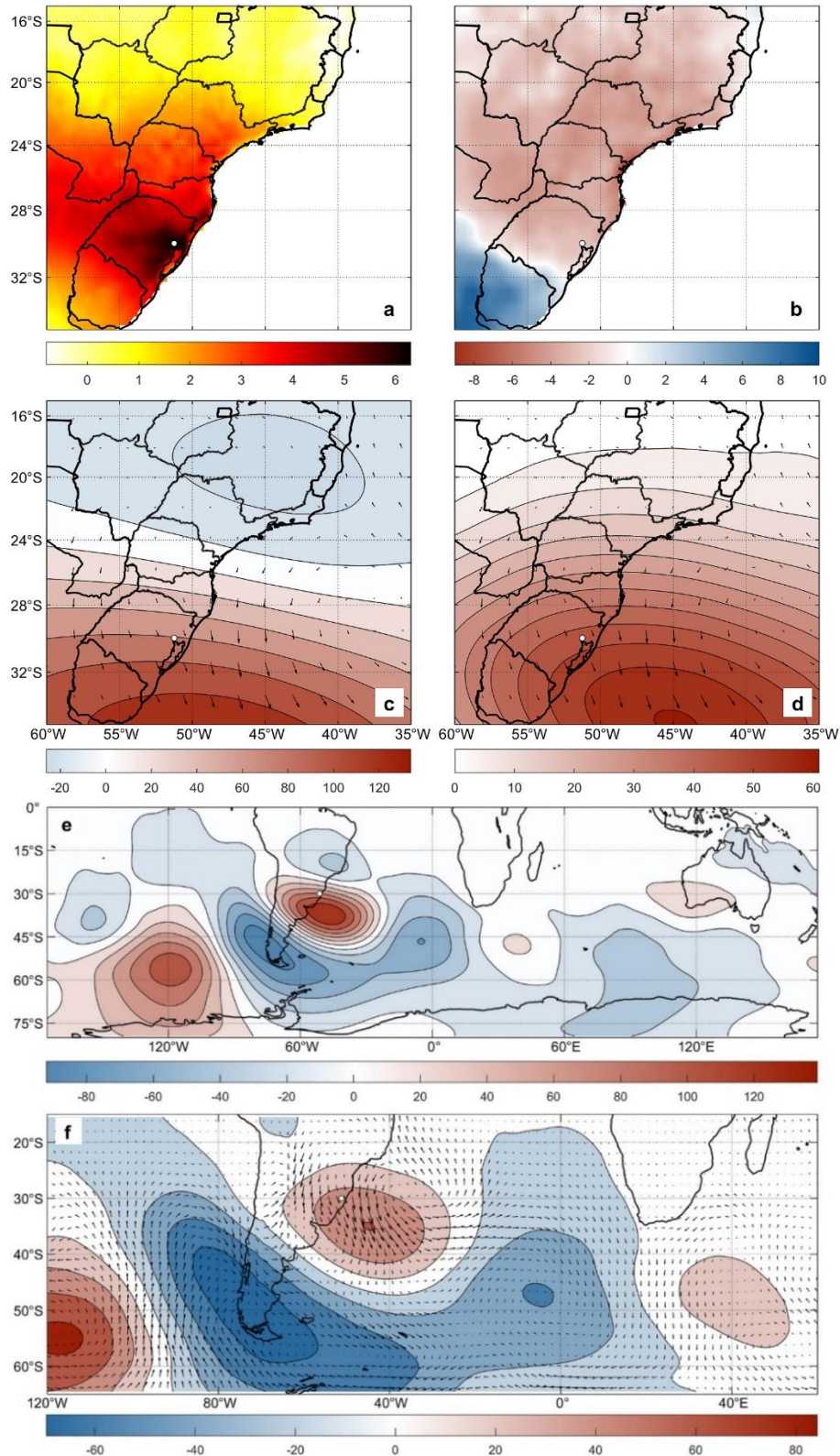


Figura 16. Mesmo que Figura 15, para a cidade de Florianópolis/SC.

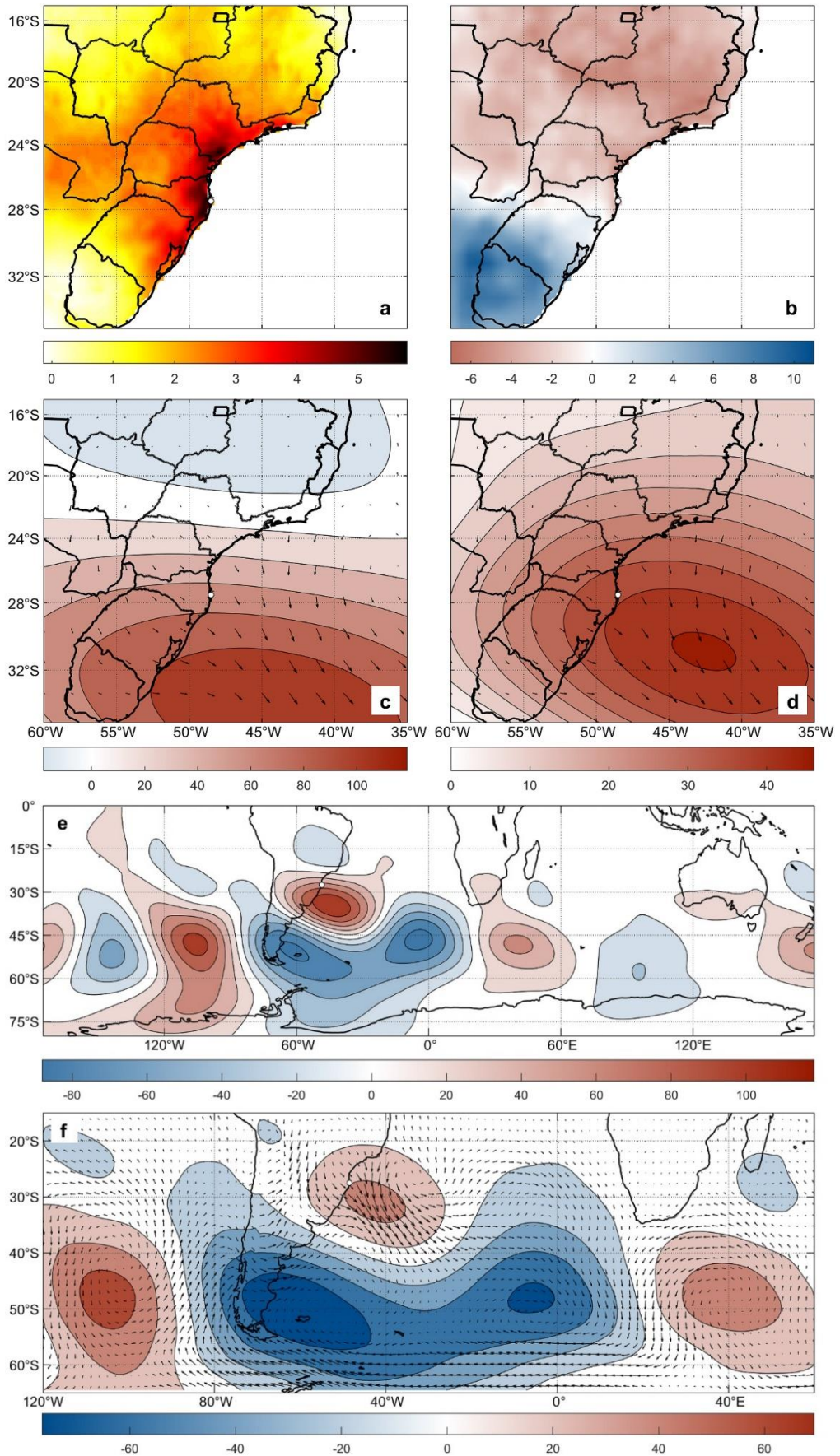


Figura 17. Mesmo que Figura 15, para a cidade de Curitiba/PR.

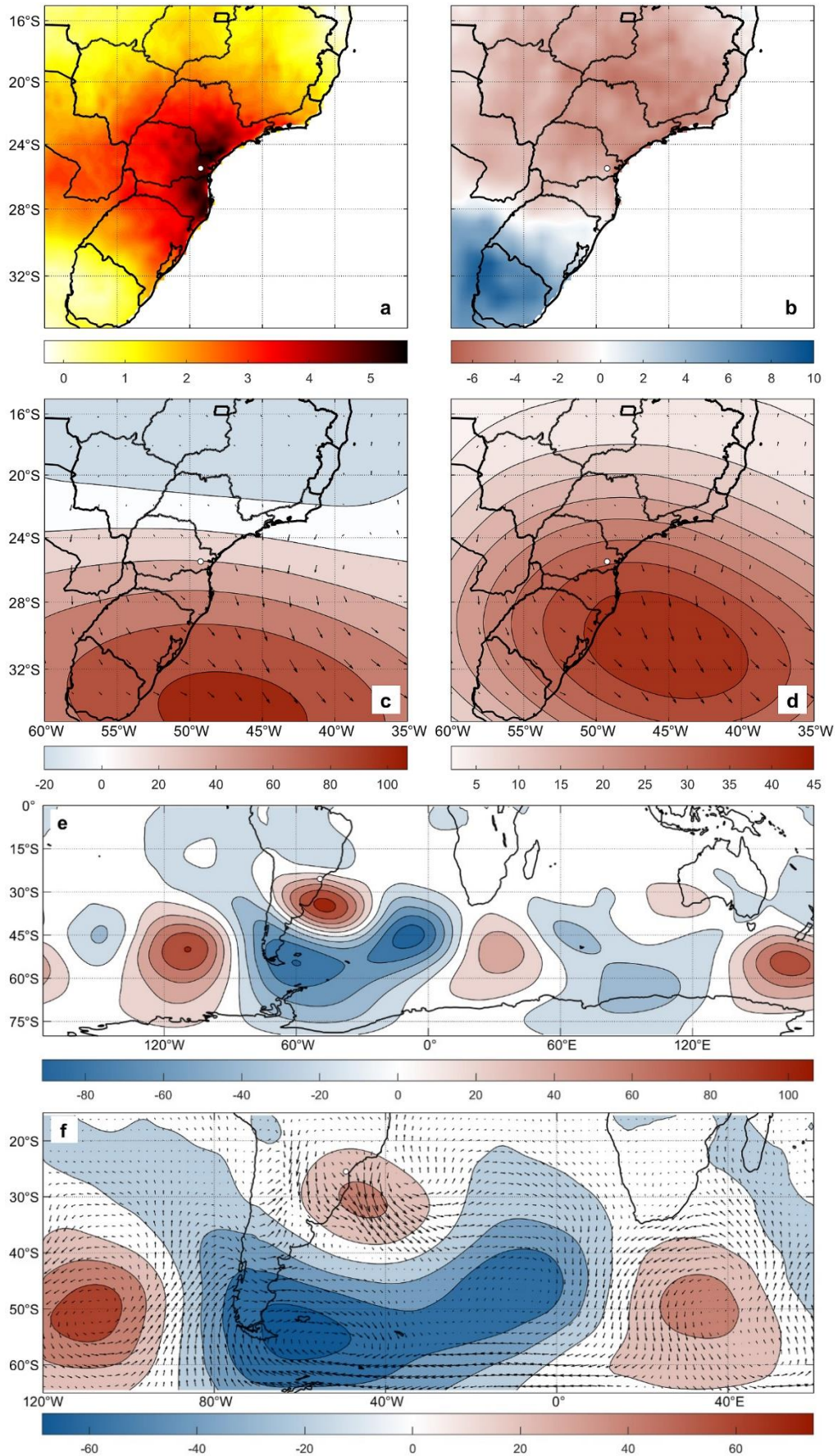


Figura 18. Mesmo que Figura 15, para a cidade de Maringá/PR.

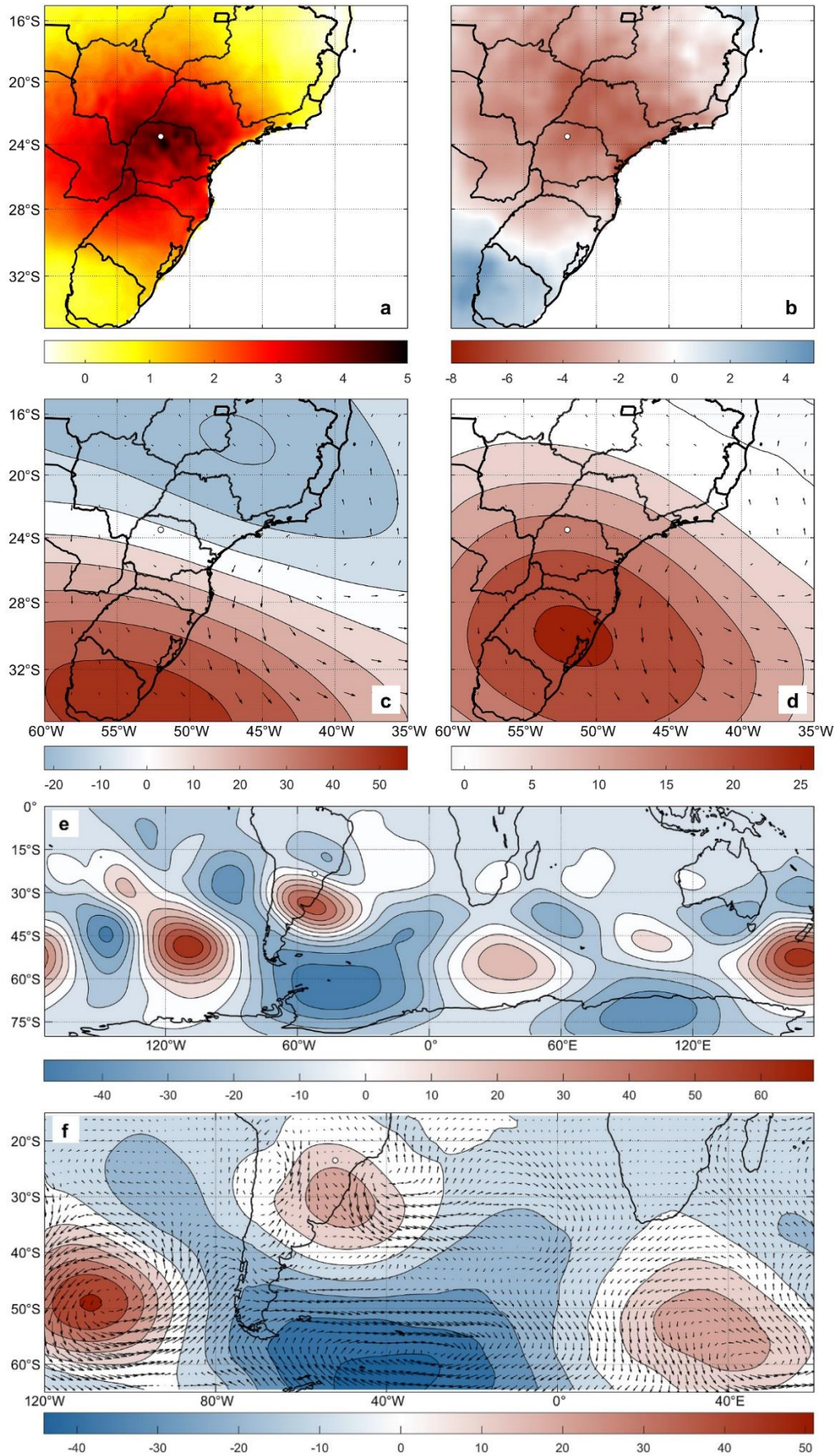


Figura 19. Mesmo que Figura 15, para a cidade de São Paulo/SP.

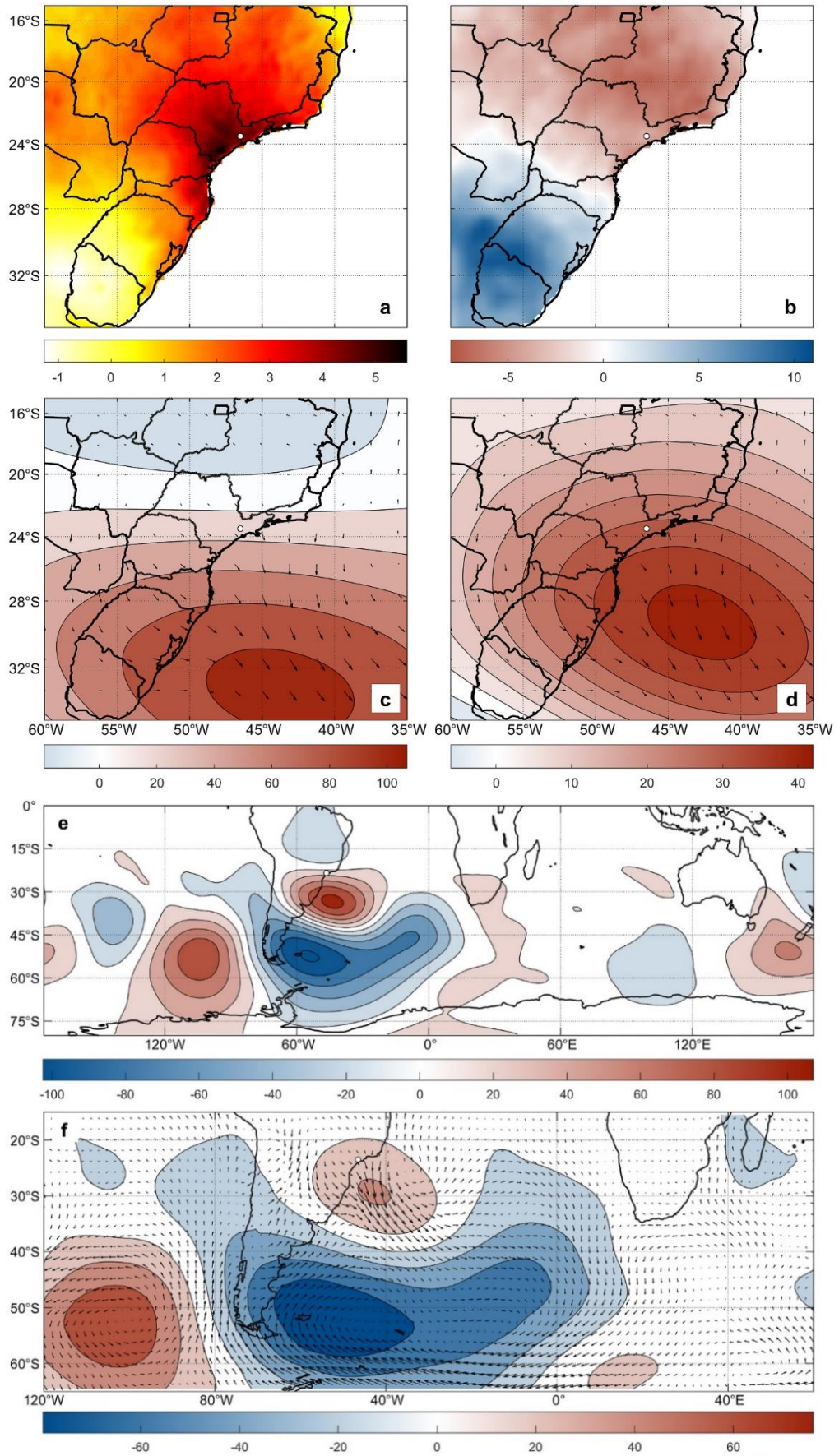


Figura 20. Mesmo que Figura 15, para a cidade de São José do Rio Preto/SP.

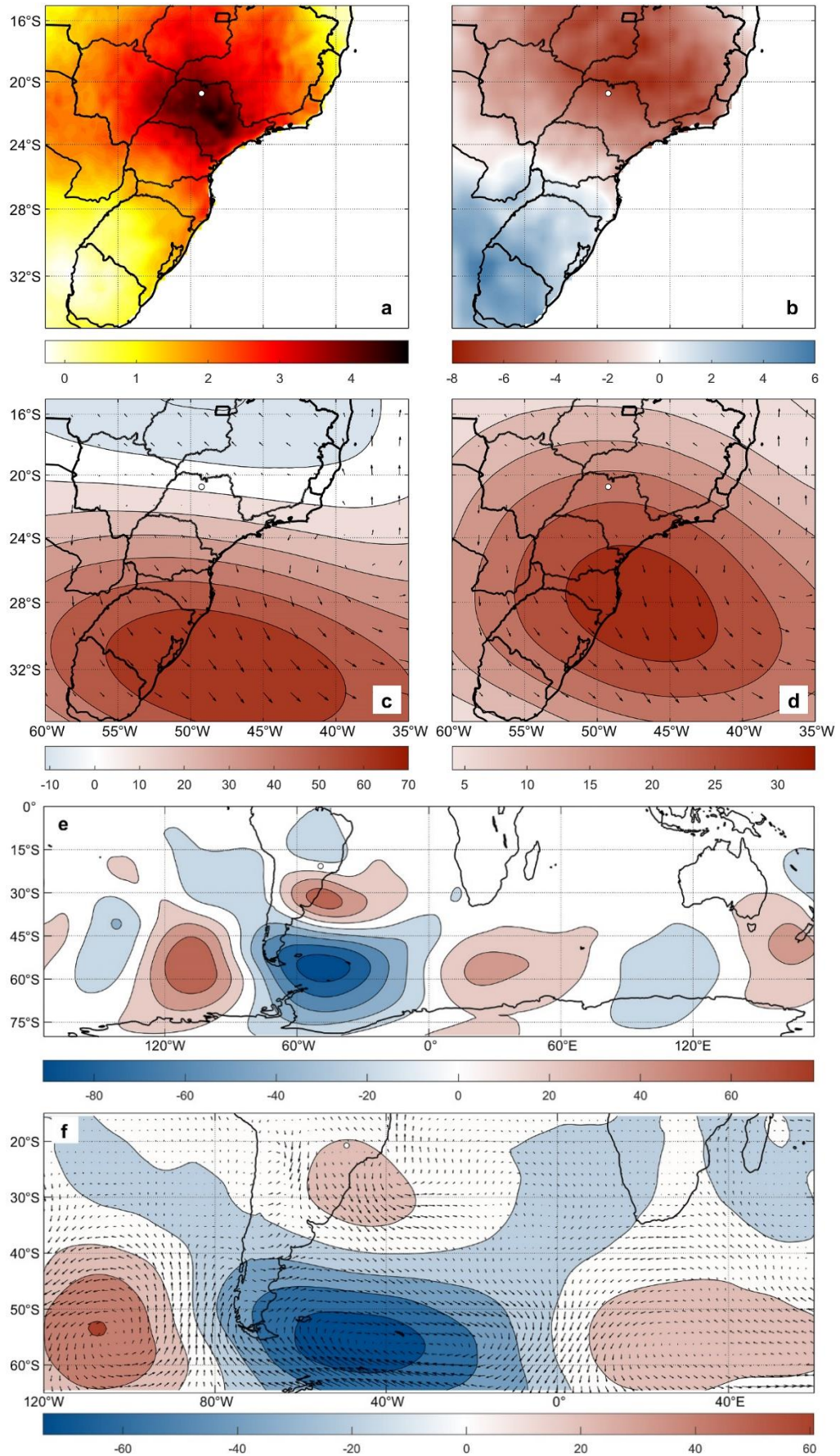
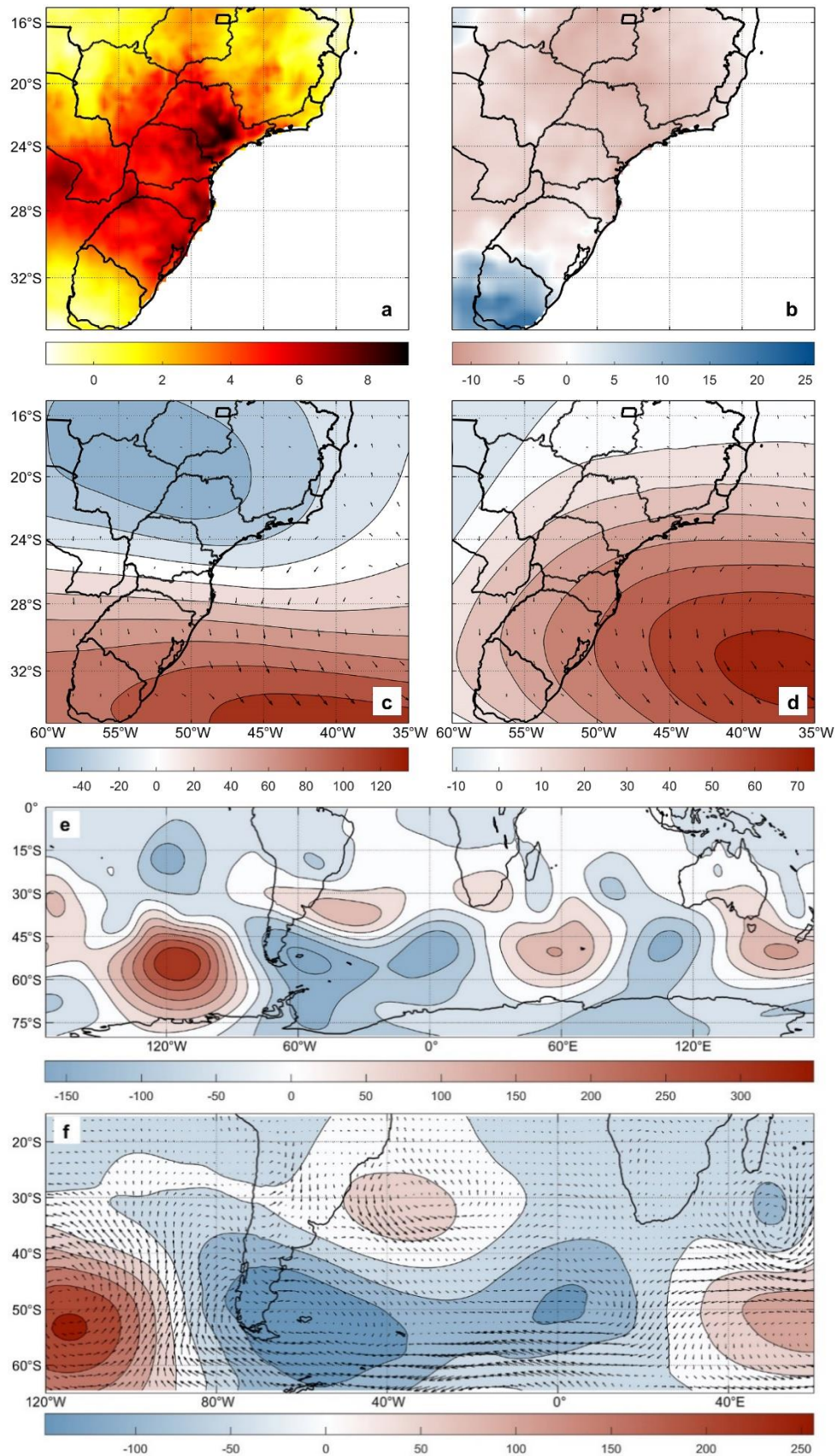


Figura 21. Mesmo que Figura 15, para o evento de OC massivo do verão de 2014 detectado nas cidades de São Paulo, São José do Rio Preto, Curitiba, Maringá, Florianópolis e Porto Alegre (composição feita para os dias 31/01 a 09/02/2014).



5. CONCLUSÕES

A série histórica de OC aponta para uma tendência significativa de aumento no número de dias de OC durante o período de 1980 a 2019 para quase toda região sudeste, grande parte da região centro-oeste e nordeste da região sul. Os resultados encontrados para o levantamento das tendências demonstram que o aumento do número de dias é regido pelo aumento na frequência dos eventos. Tendências para aumento na intensidade média e máxima dos eventos se mostraram estatisticamente mais significativas do que tendências para decréscimo.

Os resultados da caracterização meteorológica dos eventos indicam que os mecanismos associados ao desenvolvimento de OCs durante o verão para a região sul e sul da região sudeste do Brasil são semelhantes aos associados ao desenvolvimento de OCMs no Atlântico Sul Sudoeste, com bloqueios atmosféricos atuantes responsáveis por condições de tempo aberto e consequente aumento da atividade radioativa solar, e padrões de circulação anti-ciclônicos de larga escala que impedem o avanço de massas de ar frias. Os resultados indicam que o posicionamento do sistema de alta pressão exerce influência sobre o local onde os eventos ocorrem.

Este mecanismo também é responsável por provocar anomalias negativas de precipitação em regiões que se estendem em direção ao norte com grande extensão para além do local onde se desenvolvem os extremos de temperatura; e anomalias positivas deslocadas ao sul do local dos eventos. Caso a tendência de aumento na frequência dos eventos persista, é possível esperar também um aumento no número de eventos extremos de precipitação associados com inundações e déficits hídricos para as regiões afetadas por cada um destes dois diferentes padrões.

Foram encontrados indícios de que a modulação da OIP sobre a OMJ não é suficiente para explicar a magnitude das tendências observadas de aumento de frequência/número de dias de OC durante o verão para os municípios analisados neste estudo, porém é importante dar continuidade ao monitoramento dos eventos durante os próximos anos de fase quente do Pacífico para certificar de que os eventos observados recentemente não se tratam de *outliers*. Os resultados também sugerem que o aumento de número de dias coincidentes de OC para a região sul e sudeste podem estar associados a um aumento na extensão espacial desses eventos.

Embora exista um consenso científico amplo de que as tendências crescentes para frequência e intensidade de eventos climáticos extremos como as OCs estejam associadas com o aumento da temperatura provocada pelo aquecimento global, são necessárias maiores análises para entender as transformações em curso nos processos físicos responsáveis por desencadear estes eventos, que justifiquem as mudanças observadas.

6. BIBLIOGRAFIA

ALEXANDER, L. V., ZHANG, X., PETERSON, T. C., CAESAR, J., GLEASON, B., TANK, A. M. G. K., HAYLOCK, M., COLLINS D., TREWIN, B., RAHIMZADEH, F., TAGIPOUR, A., KUMAR, K. R., REVADEKAR, J., GRIFFITHS, G., VINCENT, L., STEPHENSON, D. B., BURN, J., AGUILAR, E., BRUNET, M., TAYLOR, M., NEW, M., ZHAI, P., RUSTICUCCI, M., VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.* 111(D5): D05109, 2006.

AIVALIOTI, S. Electricity Sector Adaptation to Heat Waves. Columbia Law School, Columbia Public Law Research Paper No. 14-439, 2015.

ANDRADE, K. M. Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE -14056-DI/1067, 2007.

AÑEL, J. A., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, M., LABANDEIRA, X., LÓPEZ-OTERO, X., TORRE, L. D. L. Impact of Cold Waves and Heat Waves on the Energy Production Sector. *Atmosphere*, 8(11), 209, 2017.

ÁVILA-DÍAZ, Á., BENEZOLI, V., JUSTINO, F., TORRES, R., WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Clim Dyn* 55, 1403–1426, 2020.

BARRIOPEDRO, D., FISCHER, E. M., LUTERBACHER, J., TRIGO, R. M., GARCÍA-HERRERA, R. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332(6026): 220–224, 2011.

BASTOS, A., GOUVEIA, C. M., TRIGO, R. M., RUNNING, S. W. Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe. *Biogeosciences*, 11(13), 3421–3435, 2014.

BLACK, E., BLACKBURN, M., HARRISON, G., HOSKINS, B., METHVEN, J. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather* 59(8): 217–223, 2004.

BORCHERS, A. N., BOWMAN, D. M. J. S., PALMER, A. J., JOHNSTON, F. H. Climate Change, Wildfires, Heatwaves and Health Impacts in Australia. In: Akhtar R. (eds) *Extreme Weather Events and Human Health*. Springer, Cham, 2020.

BUEHLER, T., RAIBLE, C. C., STOCKER, T. F. The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40. *Tellus*, 63A, 212–222, 2011.

CAI, W., MCPHADEN, M. J., GRIMM, A. M. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nat Rev Earth Environ* 1, 215–231, 2020.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v. 15, p. 2377-2394, 2002a.

- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. *J. Climate*, 17, p. 88-108, 2004.
- CIAVARELLA, A., COTTERILL, D., STOTT, P., KEW, S., PHILIP, S., OLDENBORGH, G. J. V., SKÅLEVÅG, A., LORENZ, P., ROBIN, Y., OTTO, F., HAUSER, M., SENEVIRATNE, S. I., LEHNER, F., ZOLINA, O. Prolonged Siberian heat of 2020. *World Weather Attribution*, 2020.
- COELHO, C. A. S. DE OLIVEIRA, C. P., AMBRIZZI, T. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Clim. Dyn.* 46, 3737–3752, 2015.
- COELHO, C. A. S., CARDISI, D. H. F., FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* 125, 769–784, 2016.
- COSTA, N. V. Impacto dos Bloqueios Atmosféricos no Oceano Atlântico Sul Sudoeste. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2018.
- COWAN, T., PURICH, A., PERKINS, S., PEZZA, A., BOSCHAT, G., SADLER, K. More Frequent, Longer, and Hotter Heat Waves for Australia in the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 27, 5851–5871, 2014.
- DE BONO, A., PEDUZZI, P., KLUSER, S., GIULIANI, G. Impacts of Summer 2003 Heat Wave in Europe. *United Nations Environment Programme, Environment Alert Bulletin*, 2, 2004.
- DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ANDRAE, U., BALMASEDA, M. A., BALSAMO, G., BAUER, P., BECHTOLD, P., BELJAARS, A. C. M., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., DELSOL, C., DRAGANI, R., FUENTES, M., GEER, A. J., HAIMBERGER, L., HEALY, S. B., HERSBACH, H., HÓLM, E. V., ISAKSEN, L., KÅLLBERG, P., KÖHLER, M., MATRICARDI, M., MCNALLY, A. P., MONGE-SANZ, B. M., MORCRETTE, J.-J., PARK, B.-K., PEUBEY, C., DE ROSNAY, P., TAVOLATO, C., THÉPAUT, J. N., VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 137, 553–597, 2011.
- DOLE, R., HOERLING, M., PERLWITZ, J., EISCHEID, J., PEGION, P., ZHANG, T., QUAN, X. W., XU, T., MURRAY, D. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.* 38(6): L06702, 2011.
- DRUMOND, A. Anomalias de TSM no Hemisfério Sul e seu Impacto na Monção Sul Americana. Tese de Doutorado em ciências Atmosféricas pela Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2005.
- ENGLAND, M. H., et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Climate Change*, 4, 222–227, 2014.

- FICK, S. E., HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315, 2017.
- FISCHER, E. M., KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat. Clim. Change* 5: 560–564, 2015.
- FISCHER, E. M., SENEVIRATNE, S. I., VIDALE, P. L., LÜTHI, D., SCHÄR, C. Soil moisture–atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *J. Climate*, 20, 5081–5099, 2007.
- FOLLAND, C. Interdecadal Pacific Oscillation time series. Met Office Hadley Centre for Climate Change, 2017.
- GARCÍA-HERRERA, R., DÍAZ, J., TRIGO, R. M., LUTERBACHER, J., FISCHER, E. M. A review of the European summer heat wave of 2003. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 40(4), 267–306, 2010.
- GEIRINHAS, J. L., TRIGO, R. M., LIBONATI, R., COELHO, C. A. S., PALMEIRA, A. C. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1760-1776, 2017.
- GETIRANA, A. C. V. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *J. Hydrometeorol.* 17, 591–599, 2015.
- GOSLING, S. N., MCGREGOR, G. R., LOWE, J. A. Climate change and heat-related mortality in six cities part 2: climate model evaluation and projected impacts from changes in the mean and variability of temperature with climate change. *Int. J. Biometeorol.* 53(1), 31–51, 2009.
- HENDON, H. H., C. ZHANG, AND J. D. GLICK. Interannual variation of the Madden–Julian oscillation during austral summer. *J. Climate*, 12, 2538–2550, 1999.
- KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.
- KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 813-835, 1992.
- KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Rev. Bras. Meteo.*, 3, 217-231, 1988.
- LEE, S.-K., PARK, W., BARINGER, M. O., GORDON, A. L., HUBER, B., LIU, Y. Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus. *Nat. Geosci.*, 8, 445–449, 2015.
- LINARES, C., DIAZ, J. Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis with previous studies about mortality (Madrid). *Eur. J. Public Health*. 18(3), 317–322, 2008.
- LOPES, A. F. de M. Avaliação da Chuva em Episódios de ZCAS na Região Sudeste do Brasil - Estudo de Caso: Bacia do Rio Grande/ André Felipe de Matos Lopes. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

- LOPEZ, H., DONG, S., LEE S.-K., CAMPOS, E. Remote influence of Interdecadal Pacific Oscillation on the South Atlantic meridional overturning circulation variability. *Geophys. Res. Lett.* 43, 8250–8258, 2016.
- MADDEN, R. A., JULIAN, P. R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1109–1123, 1972.
- MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245–25, 1945.
- MARENGO, J. A., CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in southern Brazil for 1960–2002. *Int. J. Climatol.* 28(7): 893–904, 2008.
- MCEVOY, D., AHMED, I., MULLETT, J. The impact of the 2009 heat wave on Melbourne's critical infrastructure, *Local Environment*, 17:8, 783-796, 2012.
- MEEHL, G. A., TEBALDI, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305(5686): 994–997, 2004.
- MET OFFICE, Hadley Centre for Climate Change. Annual average interdecadal Pacific oscillation index. 19/10/2017. Disponível em: http://archive.stats.govt.nz/browse_for_stats/environment/environmental-reporting-series/environmental-indicators/Home/Atmosphere-and-climate/interdecadal-pacific-oscillations.aspx. Acessado em: 24/08/2020.
- NIETO-FERREIRA, R., T. M. RICKENBACH, AND E. A. WRIGHT. The role of cold fronts in the onset of the monsoon season in the South Atlantic convergence zone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 908–922, 2011.
- NIEVES, V., WILLIS, J. K., PATZERT, W. C. Recent hiatus caused by decadal shift in Indo-Pacific heating. *Science* 349, 532–535, 2015.
- OTTO, F. E. L. et al. Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, S35–S40, 2015.
- OUZEAU, G., SOUBEYROUX, J.-M., SCHNEIDER, M., VAUTARD, R., PLANTON, S. Heat waves analysis over France in present and future climate: application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Clim. Serv.* 4: 1–12, 2016.
- PERKINS, S. E., Biases and model agreement in projections of climate extremes over the tropical Pacific. *Earth Interact.* 15(24): 1–36, 2011.
- PERKINS, S. E., ALEXANDER, L. V., NAIRN, J. R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophys. Res. Lett.* 39, L20714, 2012.
- PERKINS, S. E., ALEXANDER, L.V. On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26, 4500–4517, 2013.
- PERKINS-KIRKPATRICK, S. E., LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. *Nature communications*, 11(1), pp.1-8, 2020.

- PFAHL, S., WERNLI, H. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L12807, 2012.
- REVICH, B. A. Heat-wave, air quality and mortality in European Russia in summer 2010: preliminary assessment. *Ekologiya Cheloveka* no.7 pp. 3-9 ref. 22, 2011.
- RODRIGUES, R. R., TASCHETTO, A. S., GUPTA, A. S., FOLTZ, G. R. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. *Nat. Geosci.*, 12, 620–626, 2019.
- RODRIGUES, R. R., WOOLLINGS, T. Impact of Atmospheric Blocking on South America in Austral Summer. *J. Climate*. 2017; 30: 1821-1837, 2017.
- RUSTICUCCI, M. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmos. Res.* 106: 1–17, 2012.
- SÁNCHEZ-LUGO, A. South America [in “State of the Climate in 2014”]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, S178–S184, 2015.
- SATYAMURTI, P., NOBRE, C., SILVA DIAS, P. L. South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, D. J. Karoly and D. G. Vincent, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, p. 119–139, 1998.
- SETH, A., FERNANDES, K., CAMARGO, S. J. Two summers of São Paulo drought: origins in the western tropical Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 42, 10816–10823, 2015.
- SILVA, P., BASTOS, A., DA CAMARA, C. C., LIBONATI, R. Future projections of fire occurrence in Brazil using EC-earth climate model. *Rev. Brasil. Meteorol.*, 31(3), 288–297, 2016.
- SILLMANN, J., CROCI-MASPOLI, M., KALLACHE, M., KATZ, R. W. Extreme cold winter temperatures in Europe under the influence of North Atlantic atmospheric blocking. *J. Climate*, 24, 5899–5913, 2011.
- SKANSI, M., BRUNET, M., SIGRÓ, J., AGUILAR, E., GROENING, J. A., BENTANCUR, O. J., GEIER, Y. R. C., AMAYA, R. L. C., JÁCOME, H., RAMOS, A. M., ROJAS, C. O., PASTEN, A. M., MITRO, S. S., JIMÉNEZ, C. V., Martínez R., ALEXANDER, L. V., JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planet. Change*, 100, 295–307, 2013.
- SOARES, D. D. B., LEE, H., LOIKITH, P. C. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? *Int. J. Climatol.*, 1493, 1483–1493, 2017.
- STEFANON, M., D’ANDREA, F., DROBINSKI, P. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environ. Res. Lett.*, 7, 014023, 2012.
- STOTT, P. A., STONE, D. A., ALLEN, M. R. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432(7017): 610–614, 2004.

TRENBERTH, K. E., JONES, P. D., AMBENJE, P., BOJARIU, R., EASTERLING, D., TANK, A., PARKER, A., RAHIMZADEH, F., RENWICK, J. A., RUSTICUCCI, M., SODEN, B. Observations: surface and atmospheric climate change. Chapter 3. *Climate Change*, 235–336, 2007.

VAUTARD, R., BAUCHER, O., OLDENBORGH, G. J. V., OTTO, F., HAUSTEIN, K., VOGEL, M. M., SENEVIRATNE, S. I., SOUBETROUX, J.-M., SCHNEIDER, M., DROUIN, A., RIBES, A., KREIENKAMP, F., STOTT, P., AALST, M. V. Human contribution to the record-breaking July 2019 heat wave in Western Europe. *World Weather Attribution*, 2019.

VINCENT, L. A., PETERSON, T. C., BARROS, V. R., MARINO, M. B., RUSTICUCCI, M., CARRASCO, G., RAMIREZ, E., ALVES, L. M., AMBRIZZI, T., BERLATO, M. A., GRIMM, A. M., MARENGO, J. A., MOLION, L., MONCUNILL, D. F., REBELLO E., ANUNCIACÃO Y. M. T., QUINTANA J., SANTOS J. L., BAEZ J., CORONEL, G., GARCIA, J., TREBEJO, I., BIDEGAIN, M., HAYLOCK, M. R., KAROLY, D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *J. Clim.* 18(23), 5011–5023, 2005.

XOPLAKI, E., GONZÁLEZ-ROUCO, J. F., LUTERBACHER, J., WANNER, H. Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Clim. Dyn.* 20(7–8): 723–739, 2003.

ZHANG, C. Madden–Julian oscillation. *Rev. Geophys.*, 43, 2005.