

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
METEOROLOGIA**

**Nicolle Cordero Simões dos Reis**

**VARIABILIDADE DAS ONDAS DE CALOR NA REGIÃO  
SUBTROPICAL DO BRASIL**

Santa Maria, RS, Brasil

2017

**PPGMET/UFSM, RS**

**DOS REIS, Nicolle Cordero Simões**

**Mestre 2017**

**Nicolle Cordero Simões dos Reis**

**VARIABILIDADE DAS ONDAS DE CALOR NA REGIÃO  
SUBTROPICAL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de concentração em Climatologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Meteorologia**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Nathalie Tissot Boiaski

Santa Maria, RS, Brasil

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cordero Simões dos Reis, Nicolle  
Variabilidade das Ondas de Calor na Região  
Subtropical do Brasil / Nicolle Cordero Simões dos Reis. -  
2017.  
47 p. ; 30 cm

Orientadora: Nathalie Tissot Boiaski  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2017

1. Ondas de Calor 2. Variabilidades Climáticas I.  
Tissot Boiaski, Nathalie II. Título.

**Nicolle Cordero Simões dos Reis**

**VARIABILIDADE DAS ONDAS DE CALOR NA REGIÃO  
SUBTROPICAL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de concentração em Climatologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Meteorologia**.

**Aprovado em 03 de março de 2017:**

---

**Nathalie Tissot Boiaski, Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Simone Erotildes Teleginski Ferraz, Dra. (UFSM)**

---

**Daniel Pires Bitencout, Dr. (Fundacentro-CESC) - Videoconferência**

Santa Maria, RS, Brasil

2017

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Profa. Dra. Nathalie Tissot Boiaski pela orientação, amizade e todo o conhecimento transmitido durante o mestrado.

À Profa. Dra. Simone Ferraz por acompanhar e contribuir com o meu trabalho durante o mestrado, e pelos conhecimentos transmitidos desde a graduação.

Às minhas colegas de laboratório Flávia Rosso e Elisângela Finotti pelo companheirismo e conhecimentos compartilhados.

Aos meus pais por todo o apoio, compreensão e carinho recebidos em qualquer circunstância, sendo através de uma carona até à UFSM ou de uma manhã tranquila de chimarrão. Este título também é de vocês.

À minha irmã Verusca Reis por ser o meu maior exemplo. Sei que apesar da distância tenho um porto seguro.

À minha amiga Ana Carolina Rodrigues Silveira por ter me apresentado este caminho, me acompanhar desde o primeiro dia e pelas palavras positivas nos momentos mais difíceis.

Ao quarteto, André Parcianello, Felipe Theodorovitz, Flávia Rosso e Karol Schaly, pelo apoio, risadas e estudos desde o primeiro semestre, e por nunca me deixarem desistir. Vou levar vocês para sempre comigo.

Às amigas que fiz no decorrer do curso: Carolina Kannenberg, Caroline Bresciani e Gabriela Bittencourt. Obrigada pela convivência, risadas, desabafos e palavras de incentivo.

Às minhas amigas Érica Tex de Vasconcellos e Rebeca Brum, por me acompanharem há tantos anos em todas as situações e por toda a compreensão no meio da correria.

Às minhas amigas Caroline Schneider Xavier, Suélen Heck e Thais Cremonese pela amizade e torcida, mesmo que às vezes a correria do dia a dia impeça os nossos encontros.

Aos meus amores de quatro patas, por me fazerem sorrir todos os dias, independentemente da situação.

A todos vocês que fizeram parte desse caminho: obrigada por me mostrarem o sol em meio às tempestades.

*"A atmosfera é o exemplo que a natureza nos deu para que estejamos sempre na busca incessante do equilíbrio."  
(O Autor)*

## RESUMO

### VARIABILIDADE DAS ONDAS DE CALOR NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL

AUTORA: Nicolle Cordero Simões dos Reis

ORIENTADORA: Nathalie Tissot Boiaski

Recentemente, vem sendo muito discutido na comunidade científica acerca do aquecimento global desde a década de 70 e seus impactos sobre os extremos de temperatura. Alguns estudos afirmam que houve um hiato neste aquecimento durante a primeira década do século 21. No entanto, mesmo que este hiato se confirme, resultados apresentados na literatura apontam para um aumento na frequência, intensidade e persistência dos extremos neste mesmo período. Além das atividades antropogênicas, variabilidades naturais do clima podem estar controlando estes períodos mais lentos e acelerados de aquecimento. Tendo em vista os impactos que os extremos de temperatura podem causar, tanto para a sociedade, como para a economia, este trabalho visa analisar a variabilidade das ondas de calor na região subtropical do Brasil de 1980 a 2013. Ou seja, verificar como estes extremos estão se comportando ao longo das décadas, e relacioná-los com a Zona de Convergência do Atlântico Sul e com a Oscilação Antártica. Para isto, foram utilizados dados diários de temperatura máxima e altura geopotencial em altos e baixos níveis, bem como os eventos de ZCAS de 1992 a 2013. Através da metodologia aplicada, a região subtropical foi dividida em dois (regiões 1 e 2). Para ambas, verificou-se um aumento na frequência, intensidade e persistência das ondas de calor desde a década de 80. Além disso, os eventos apresentaram uma característica sazonal, com maior frequência no período do inverno. Com relação à ZCAS, fica clara a influência da mesma sobre as anomalias de temperatura na região mais ao sul da sua posição climatológica, no entanto houveram poucos extremos de temperatura durante o período que a ZCAS atua. A Oscilação Antártica também apresentou uma importante relação com as características estatísticas das ondas de calor. Os eventos foram mais frequentes e persistentes durante a AAO-, enquanto que na AAO+ foram mais intensos. Foi analisado também o comportamento da atmosfera durante as ondas de calor em cada uma das fases. As duas regiões apresentaram comportamentos semelhantes, sendo que na fase negativa as ondas de calor são favorecidas pela atuação de um bloqueio atmosférico no Pacífico Sudeste em conjunto com anomalias positivas sobre o Atlântico, enquanto que na fase positiva as anomalias positivas no Atlântico Sul têm um papel dominante no desenvolvimento das ondas de calor. Este padrão se repete em altos e baixos níveis, mostrando que os sistemas estão verticalmente alinhados.

**Palavras-chave:** Ondas de Calor. Subtrópicos. Variabilidades Climáticas.

## ABSTRACT

### VARIABILITY OF HEAT WAVES IN THE SUBTROPICAL REGION OF BRAZIL

AUTHOR: Nicolle Cordero Simões dos Reis

ADVISOR: Nathalie Tissot Boiaski

Recently, much has been discussed in the scientific community about global warming since the 1970s and its impacts on temperature extremes. Some studies refer to a time of the 21st century. However, even if this gap is confirmed, results in the literature point to an increase in the frequency, intensity and persistence of the extremes in this same period. In addition to anthropogenic activities, climatic differences may be controlling these slower and faster periods of heating. Considering the impacts that extremes of temperature can cause, both for society and the economy, this work aims to analyze the variability of heat waves in the subtropical region of Brazil from 1980 to 2013. That is, verify how these extremes are behaving over the decades, and relate them to the South Atlantic Convergence Zone and the Antarctic Oscillation. For this, daily data of maximum temperature and geopotential height in high and low levels were used, as well as the SACZ events from 1992 to 2013. Through the applied methodology, the subtropical region was divided in two (regions 1 and 2). For both, there has been an increase in the frequency, intensity and persistence of heat waves since the 80's. In addition, the events presented a seasonal characteristic, more frequently in the winter period. Regarding the SACZ, it is clear the influence of the same on the temperature anomalies in the region more to the south of its climatological position, however there were few extremes of temperature during the period that the SACZ acts. The Antarctic Oscillation also presented an important relation with the statistical characteristics of the heat waves. The events were more frequent and persistent during AAO-, whereas in AAO + they were more intense. The behavior of the atmosphere during the heat waves in each of the phases was also analyzed. The two regions presented similar behavior, being that in the negative phase the heat waves are favored by the action of an atmospheric blockade in the Southeast Pacific together with the positive anomalies on the Atlantic, while in the positive phase the South Atlantic positive anomalies plays a dominant role in the development of heat waves. This pattern repeats at high and low levels, showing that the systems are vertically aligned.

**Keywords:** Heat Waves. Subtropics. Climate Variability.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>08</b>
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	Objetivo Geral.....	10
1.1.2	Objetivos Específicos.....	10
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>11</b>
2.1	ONDAS DE CALOR.....	11
2.2	COMPORTAMENTO DA ATMOSFERA.....	12
2.2.1	Bloqueios Atmosféricos.....	12
2.2.2	Variabilidades Climáticas e Padrões de Teleconexão.....	15
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
3.1	DADOS E REGIÃO DE ESTUDO.....	16
3.2	DEFINIÇÃO DAS ONDAS DE CALOR.....	18
3.3	RELAÇÃO COM A ZCAS E AAO.....	21
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>22</b>
4.1	VARIABILIDADE DAS ONDAS DE CALOR.....	22
4.2	RELAÇÃO COM A ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL.....	29
4.3	RELAÇÃO COM A OSCILAÇÃO ANTÁRTICA.....	32
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento no número de eventos climáticos extremos nos últimos anos, o debate acerca do aquecimento global e das mudanças climáticas provocadas pelo mesmo, tem se intensificado na comunidade científica. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), grande parte do aumento da temperatura média da superfície, em escala global, observado a partir de 1970 se deve às atividades humanas, que causam aumento na emissão de gases do efeito estufa, por exemplo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Além disso, outro fator que influencia no aquecimento são as variabilidades naturais do clima, como o El Niño Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Antártica (AAO), entre outros.

A partir dos anos 70, cada década foi mais quente do que a anterior e, recentemente, a Organização Meteorológica Mundial (WMO, sigla em inglês) relatou que o século 21 vem sendo o mais quente dos registros. A elevação da temperatura média global é apenas uma das consequências geradas pelo aumento na emissão dos gases do efeito estufa (Trenberth et al., 2009), a qual aumenta o risco de ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas, ondas de calor e furacões (IPCC, 2014).

As ondas de calor são amplamente definidas como um período de 6 dias consecutivos ou mais em que a temperatura de uma região permanece acima da sua média climatológica, gerando desconforto para grande parte da população. Durante a última década, uma considerável quantidade de ondas de calor severas ocorreu em diversas regiões do globo (Perkins et al., 2012). A intensidade dos impactos causados pelas altas temperaturas varia de acordo com a quantidade de calor acumulado durante o evento e com a capacidade de cada local em desenvolver estratégias durante a fragilidade.

Cerne e Vera (2010) analisaram a estrutura espacial e temporal das anomalias de circulação atmosférica associadas às ondas de calor nos subtrópicos da América do Sul, identificando 26 eventos entre os anos de 1979 e 2003. Os autores observaram um trem de ondas ao longo do sul do Oceano Pacífico, se prolongando da Austrália até o sul da América do Sul. Porém, se essas anomalias positivas de temperatura persistirem por períodos mais longos do que a escala sinótica (Rusticucci et al., 1995; Norte et al., 2000), caracteriza-se como um evento extremo.

Apesar do grande debate sobre o aquecimento global e os extremos quentes, alguns autores (Meehl et al., 2011; Trenberth et al., 2013) afirmam que a temperatura média global aumentou mais lentamente a partir do final dos anos 90. Este período de desaceleração ficou

conhecido como hiato do aquecimento global (1999-2013). No entanto, trabalhos encontrados na literatura (Meehl et al., 2013; Clement, et al., 2014) apontam uma forte influência de variabilidades naturais do clima durante os períodos mais lentos e mais acelerados do aquecimento. Tem-se como exemplo a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO, sigla em inglês), que na sua fase positiva eleva a média global da temperatura próximo à superfície e diminui esta média durante a fase negativa, já que nesta última, uma parte do calor fica acumulado no oceano profundo. Outro exemplo pôde ser constatado nos anos de 2015 e 2016, recordes de temperatura média da superfície global, segundo a WMO. Este aquecimento mais intenso da superfície é associado ao forte El Niño ocorrido em 2015 (Trenberth et al., 2015) e primeiros meses de 2016.

Além das variabilidades citadas, há uma considerável especulação sobre influências externas ao sistema climático. O período do hiato coincide com o aumento dos aerossóis troposféricos e estratosféricos, que provavelmente reduziram a incidência de radiação solar sobre a superfície terrestre, amenizando o aquecimento causado pelos gases estufa (Clement, et al., 2014; Trenberth et al., 2015). Em contrapartida, Karl et al. (2015) afirmaram que não houve desaceleração no aumento da temperatura média global. Uma das justificativas é que o aquecimento vem sendo subestimado através de análises estatísticas sobre um banco de dados incompleto, com melhor cobertura nas regiões temperadas e nações desenvolvidas, além de haver limitações de dados nas regiões polares do globo (Cowtan et al., 2014).

Mesmo que se confirme uma diminuição na taxa do aquecimento durante o século 21, diversos estudos recentes (Perkins et al., 2012; Seneviratne et al., 2014; Sillmann et al., 2014) mostram um aumento na frequência, intensidade e persistência de extremos quentes neste mesmo período. Além disso, estudos de modelagem (Clark et al., 2006) projetam aumentos globais nas ondas de calor no decorrer deste século. Tendo em vista que estes extremos podem gerar diversos impactos na produção agrícola, pecuária e saúde da população, bem como aumentos significativos no consumo de energia elétrica, a análise e previsão destes extremos são de grande importância para minimizar os seus prejuízos.

No Brasil, ainda existem poucos estudos sobre o comportamento das ondas de calor. Tendo em vista que as regiões sul e sudeste do país têm a sua economia baseada principalmente na agricultura e pecuária, o presente trabalho pretende analisar a variabilidade das ondas de calor, suas propriedades estatísticas, como frequência, intensidade e persistência, além de analisar como algumas variabilidades naturais do clima podem influenciar nestes extremos de temperatura.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades estatísticas, das ondas de calor na região subtropical do Brasil e verificar se existem diferenças significativas nestas propriedades ao longo das décadas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar a variabilidade das ondas de calor nos subtrópicos de Brasil e de suas propriedades estatísticas: frequência de ocorrência, intensidade e persistência.
- ii. Determinar a variabilidade sazonal, interanual e interdecadal das ondas de calor.
- iii. Investigar a relação entre as ondas de calor e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).
- iv. Relacionar os eventos de ondas de calor com a Oscilação Antártica (AAO).
- v. Analisar se existem diferenças significativas nas propriedades estatísticas, das ondas de calor entre as décadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ONDAS DE CALOR

Rusticucci e Vargas (2001) definem ondas como sendo sucessivos dias de anomalias de temperaturas de mesmo sinal. Assim, eventos meteorológicos em que a temperatura do ar está acima de um dado limiar por mais de 24 horas, podendo persistir por alguns dias, causando desconforto para a maior parte da população, são conhecidos como ondas de calor (Robinson et al., 2001), porém ainda não há uma definição universal para determinar a ocorrência do fenômeno. A WMO utiliza o *Heat Wave Duration Index* (HWDI), que define as ondas de calor como uma sequência de mais de cinco dias em que a temperatura máxima diária fica pelo menos 5°C acima da média climatológica. No entanto, esta definição é contestada por alguns autores (Radinović et al., 2012), tendo em vista que define o fenômeno com base em duas constantes arbitrariamente definidas.

Radinović (2012) afirma que o HWDI não possibilita a comparação das características das ondas de calor, tais como intensidade, frequência e persistência entre duas regiões de climas distintos. O Brasil, por exemplo, é um país de grande extensão territorial que apresenta diferentes regimes climáticos, desta forma, a utilização deste índice dificultaria a análise do fenômeno em larga escala, como comparar os parâmetros estatísticos entre as regiões Norte e Sul, por exemplo. Com base nestas afirmações, o presente trabalho analisa as propriedades das ondas de calor com base no percentil de 90%, desta maneira, cada região tem um limiar definido de acordo com suas características climáticas.

A formação das ondas de calor é associada a anticiclones quase estacionários próximos à área afetada, os quais se caracterizam por uma massa de ar subsidente, e muitas vezes estão associados com ondas de Rossby de escala planetária (Pezza et al., 2012). Além disso, os anticiclones advectam ar quente e úmido de latitudes tropicais (Cerne et al., 2010), produzindo anomalias positivas de temperatura sobre a região afetada e, por estes sistemas serem quase estacionários, as altas temperaturas persistem por alguns dias consecutivos, levando a formação de eventos meteorológicos prolongados (Rusticucci et al., 1995).

Os seus impactos variam dependendo dos locais afetados e da intensidade e persistência do evento, entre eles estão o desconforto térmico gerado para a população, mortalidade por hipertermia, problemas no abastecimento de água e energia nos centros urbanos, além de causar danos às plantas, gerando queda na produtividade agrícola, secas mais frequentes e conseqüentemente aumento do risco de incêndios.

Diversos estudos já citados anteriormente apontam um aumento na intensidade e frequência das ondas de calor ao redor do globo, além de haver uma previsão de aumento nesses extremos durante o século 21. Ceccherini et al., (2016) estimaram a tendência da temperatura máxima e analisaram a variabilidade das ondas de calor na América do Sul de 1980 a 2014. Os autores concluíram que a média da temperatura máxima tem aumentado 1°C por década no continente sul-americano, concomitantemente observaram um aumento na intensidade e frequência das ondas de calor, principalmente nos últimos 10 anos. Bitencout et al., (2016) realizaram um estudo pioneiro sobre as ondas de calor sobre todo o Brasil e também verificaram um aumento na intensidade e frequência dos eventos a partir da década de 2000.

## 2.2 COMPORTAMENTO DA ATMOSFERA

Em médios níveis, a circulação atmosférica normalmente possui um escoamento zonal de oeste, favorecendo o deslocamento de sistemas sinóticos, como frentes, ciclones e anticiclones, para leste. Porém, quando ocorrem bloqueios atmosféricos, os sistemas transientes tendem a se propagar mais lentamente do que o normal, podendo ficar estacionários e conseqüentemente prolongando as condições meteorológicas sobre determinadas regiões.

Alguns estudos afirmam que no Hemisfério Sul (HS) os bloqueios ocorrem predominantemente na região da Austrália e Nova Zelândia, seguida pela área próxima à costa oeste da América do Sul (Pacífico Sudeste) (Marques et al., 1996). Tendo em vista que ainda existem poucos estudos sobre os impactos que este sistema pode causar, principalmente no HS, e que os eventos de ondas de calor vêm sendo relacionados a eles, é importante estudar as características da circulação atmosférica durante a sua atuação.

### 2.2.1 Bloqueios Atmosféricos

Ainda não há uma única explicação para a formação, manutenção e dissipação dos bloqueios, porém a definição mais utilizada para identificação dos mesmos é o estabelecimento de uma célula anômala de alta pressão na média troposfera, também conhecida como alta de bloqueio, que deve persistir por pelo menos seis dias consecutivos (Van Loon et al., 1956) e apresentar um caráter barotrópico (Oliveira, 2011). Ainda, para que o padrão seja quase-estacionário, o deslocamento total desta célula durante o evento deve ser

menor ou igual a 25° de longitude. Já em altos níveis, deve haver uma divisão na corrente de jato, formando dois ramos e, assim, rompendo o padrão zonal (Rex et al., 1950). Além dos aspectos já citados, no HS, as altas de bloqueio se desenvolvem entre as latitudes de 50°S e 65°S, ou seja, na região polar das altas subtropicais (Damião et al., 2008; Pedroso et al., 2015).

O rompimento do padrão zonal da circulação impede que os sistemas sinóticos se propaguem normalmente de oeste para leste, tornando-os estacionários ou desviando os mesmos para nordeste ou sudeste do anticiclone (Ambrizzi et al., 2009). Assim, esse tipo de evento pode induzir efeitos no clima, gerando condições adversas e prolongadas de temperatura e precipitação nas regiões afetadas (Rex et al., 1950).

Os sistemas de alta pressão caracterizam-se por uma massa de ar subsidente, que inibe a formação de nuvens e estabiliza a atmosfera. À medida que o ar desce, ele aquece e a umidade relativa diminui, resultando em ar quente e seco próximo à superfície. A baixa nebulosidade favorece o aquecimento radiativo, tanto em superfície como em níveis mais elevados, e o que seria um ciclo de aquecimento comum pode tornar-se estacionário com o lento movimento do anticiclone, prolongando o aquecimento e, ocasionalmente, gerando ondas de calor (Nairn et al., 2013). Se as temperaturas permanecerem elevadas por um período mais longo que uma semana, o evento é caracterizado como extremo.

No HS, a frequência dos episódios de bloqueio é menor do que no Hemisfério Norte (HN), mas, segundo Coughlan et al., (1983), sua frequência sobre as regiões da Austrália e Nova Zelândia tem magnitude comparável ao HN. Oliveira et al., (2016) afirmam que a frequência desses sistemas é maior no Pacífico Sudoeste, no entanto são mais persistentes na região sudeste deste oceano. Os autores, ainda, classificam os bloqueios entre as variabilidades de baixa frequência (padrões de teleconexões) e os mecanismos de alta frequência (sistemas transientes) e os associam com trens de onda de grande escala que atravessam o Pacífico Sul, desde a Austrália até a América do Sul.

Estudos acerca da climatologia deste fenômeno revelam que nas médias latitudes do HS eles ocorrem predominantemente no período do inverno sobre o oceano Pacífico, com um máximo secundário no outono e mínimo durante os meses de verão (Damião et al., 2005). Esta maior frequência no período do inverno, se deve à maior intensidade do jato subtropical (Oliveira et al., (2016). Quando tal sistema se forma na região sudeste do Pacífico, impede que as frentes frias se desloquem sobre o continente sul-americano (Ambrizzi, Marques & Nascimento, 2009), favorecendo o aumento das temperaturas sobre grande parte da Argentina e região Sul do Brasil (Damião et al., 2005).

Frequentemente, dois tipos de bloqueio são observados no HS: do tipo dipolo e ômega invertido ( $\Omega$ ). O primeiro caracteriza-se pela presença de um sistema de baixa pressão na região equatorial da alta de bloqueio, gerando uma corrente de ar anômala de leste para oeste. Já o segundo padrão, exibe duas baixas associadas à alta de bloqueio, todas parecidas em tamanho e intensidade, formando um padrão que se assemelha à letra grega ômega. Pezza et al., (2012) analisaram a circulação geral das ondas de calor nos extratropicos da Austrália e verificaram que, na maioria dos casos, há a presença de um padrão dipolo responsável por sustentar a persistência dos eventos.

Damião (2005) analisou os padrões de circulação atmosférica durante eventos de bloqueio sobre o Pacífico Sul e verificou anomalias nos ventos em altos e baixos níveis, anomalias de altura geopotencial em 500 hPa, vorticidade em 850 hPa, pressão ao nível médio do mar, precipitação, temperatura e porcentagem do total de nuvens. O autor também afirmou que, em ambas as áreas do Pacífico (tanto sudeste, como sudoeste), esses eventos são mais frequentes e duradouros no período do inverno, sendo que o comportamento geral da atmosfera é semelhante no inverno e no verão.

Nos campos de vento em baixos e altos níveis observa-se uma circulação no sentido anti-horário, associada ao anticiclone de bloqueio, a qual gera movimento subsidente e inibe a formação de nuvens, além de favorecer o transporte de calor e umidade de norte para locais mais ao sul. Desta forma, na área onde se localiza o bloqueio, encontram-se anomalias positivas de temperatura.

Na parte equatorial do sistema, deve haver a formação de uma circulação ciclônica, característica do padrão dipolo, a qual favorece o movimento ascendente e a formação de nebulosidade, porém, em altos níveis, o vento pode apresentar um comportamento menos intenso, aproximadamente zonal, facilitando o deslocamento de sistemas transientes (Marques et al., 1996) e podendo provocar anomalias positivas de precipitação a norte do bloqueio (Damião et al., 2005).

Evidentemente, nos campos de pressão ao nível médio do mar, as pressões são mais elevadas na região do anticiclone e mais baixas ao norte do mesmo. A vorticidade relativa também apresenta anomalias positivas intensas, associadas ao vórtice anticiclônico, e negativas na região equatorial, associadas ao vórtice ciclônico. Da mesma forma, em 500 hPa, verifica-se anomalias positivas de altura geopotencial sobre a região do bloqueio e negativas ao norte.

### 2.2.2 Variabilidades Climáticas e Padrões de Teleconexão

O padrão de bloqueio associado às ondas de calor não dá uma descrição completa de como elas se formam, assim a identificação de teleconexões e a análise de como as mesmas influenciam na estrutura da circulação atmosférica, podem trazer avanços para a pesquisa sobre eventos extremos. Pezza et al., (2012) afirmam que os padrões de teleconexão podem muitas vezes estar associados à formação das ondas de calor, já que a presença de uma forçante térmica nos trópicos (como anomalias de TSM) influencia na formação de um trem de ondas em latitudes extratropicais.

A Oscilação Antártica, por exemplo, influencia no comportamento de ciclones e anticiclones em latitudes médias. Pezza et al., (2012) mostraram que as ondas de calor na Austrália estão associadas a um número de onda 4, com um padrão aproximado ao da fase positiva da AAO, no entanto a análise de correlação com as ondas de calor nesta região não mostrou uma relação significativa. A temperatura da superfície do mar (TSM) também tem influência sobre a formação de ciclones e anticiclones em baixos níveis. Quando se tem anomalias positivas na TSM, por exemplo, há o favorecimento de convecção e formação de ciclones. O contrário ocorre quando as anomalias de TSM são negativas, neste caso há uma indução de subsidência que pode contribuir para o estabelecimento da alta de bloqueio.

Oliveira et al., (2016) estudaram os efeitos do ENOS e da AAO sobre os bloqueios atmosféricos no HS. Os autores constataram que durante uma fase neutra do ENOS combinada com AAO+ os bloqueios são mais frequentes na região SW do Pacífico, já ENOS neutro com AAO- favorece a formação de bloqueios no Pacífico SE, o que pode favorecer a configuração de ondas de calor na região subtropical da América do Sul. Cerne e Vera (2010) investigaram a relação entre a variabilidade intra-sazonal e o desenvolvimento de ondas de calor nos subtropicais da América do Sul, e concluíram que a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) pode explicar cerca de 32% da variância da temperatura durante o verão na região central da Argentina, desempenhando um importante papel no comportamento dinâmico da atmosfera.

Tendo em vista a estreita relação entre os sistemas de alta e baixa frequência e que ainda existem poucos estudos que investigam esta interação, este trabalho tem como um de seus objetivos específicos fornecer um melhor entendimento de como as teleconexões de grande escala, como a AAO, influenciam no comportamento da atmosfera e no desenvolvimento de extremos de temperatura nos subtropicais do Brasil.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DADOS E REGIÃO DE ESTUDO

No presente trabalho, foram utilizados dados diários de temperatura máxima em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante o período de 1980 a 2013. Estes dados possuem uma grade com resolução espacial de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  e foram obtidos de Xavier et al., (2015). Inicialmente, foi feita uma análise preliminar para verificar o comportamento das anomalias de temperatura em todo o Brasil. Desta forma, foram calculadas as anomalias diárias de temperatura máxima (Tmax), removendo os anos bissextos e o ciclo anual médio, de 1980 a 2013 para cada ponto de grade. Tendo em vista que Radinović (2012) contesta a definição de onda de calor da WMO, que se baseia em valores arbitrários para os limiares de Tmax e persistência, as anomalias foram verificadas de duas formas:

- 1) Com base no critério da WMO, foram considerados somente os valores de anomalia de Tmax superiores a  $5^{\circ}\text{C}$ , em seguida foi calculada a média diária para as mesmas, verificado assim, o comportamento médio das anomalias diárias de Tmax acima de  $5^{\circ}\text{C}$  em todo o Brasil.
- 2) Para cada ponto de grade, calculou-se o percentil de 90% (P90) para cada dia do ano, assim, foram considerados somente os valores de anomalia acima desse limiar. Como no item anterior, calculou-se uma média para as anomalias de Tmax, com o intuito de analisar somente o comportamento médio das anomalias mais extremas.

O comportamento médio das anomalias apresentados na Figura 1, deixa clara uma das problemáticas de se definir um valor mínimo arbitrário para as anomalias de Tmax. O Brasil, por exemplo, é um país com uma vasta extensão territorial e que apresenta diferentes regimes climáticos, assim no caso de um limiar pré-definido, de  $5^{\circ}\text{C}$  neste caso, as regiões mais próximas à linha do Equador não irão apresentar uma boa resposta, já que sua amplitude térmica diária é muito pequena. Com este método só seria possível analisar os extratropicais, que possuem estações do ano bem definidas e uma amplitude térmica maior.

Já na Figura 2, em que foi feito o cálculo do P90 para cada dia do ano, observa-se os valores médios das anomalias de Tmax acima de P90. Neste caso, cada região mostra as anomalias de temperatura máxima de acordo com suas características climáticas. Regiões próximas ao Equador, que são quentes o ano inteiro e possuem baixa amplitude térmica diária, apresentam os valores mais baixos do limiar de P90, enquanto que a região subtropical,

onde há maior variabilidade da temperatura ao longo do ano, apresenta as anomalias mais significativas. Mesmo que a proposta deste estudo não seja analisar todo o território Brasileiro, este segundo método deve representar em mais detalhes as características das ondas de calor em cada região.

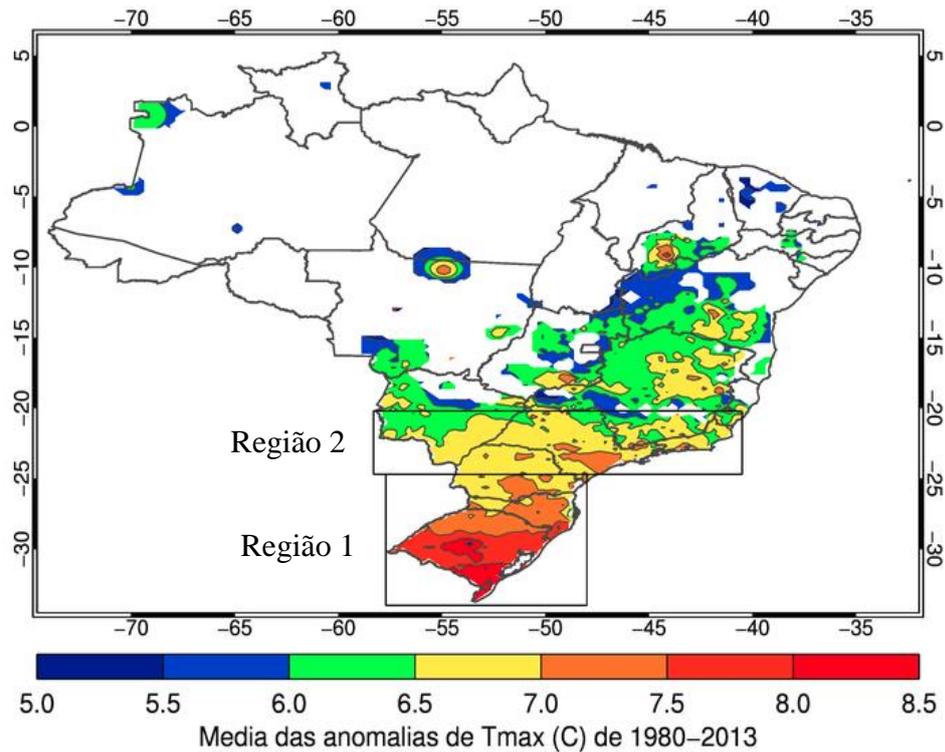


Figura 1: Média das anomalias diárias de temperatura máxima acima de 5°C no Brasil de 1980 a 2013.

Além disso, na Figura 2 pode-se verificar que a região subtropical do Brasil se subdivide em outras duas de comportamento bastante semelhantes (Sul, e parte do Sudeste e Centro-Oeste) e que, em média, apresentaram as anomalias diárias mais extremas de Tmax, acima de 3,5°C. Além disso, as regiões sul e sudeste são bastante influenciadas pela passagem de sistemas sinóticos, como ciclones, anticiclones e frentes frias. Com base nestas informações, o presente trabalho irá analisar o comportamento das ondas de calor nestas duas regiões do domínio brasileiro, daqui em diante denominadas Regiões 1 (-34° a -24,7° de latitude e -57,7° a -48° de longitude) e 2 (-24,7° a -20,2° de latitude e -58,3° a -40,5° de longitude).

Boa parte da economia da região de estudo é baseada na agricultura, logo, sabendo que as ondas de calor afetam diretamente o conforto e a saúde da população, bem como a

produtividade agrícola, e que há uma tendência de aumento na intensidade e na frequência das mesmas, é importante que se estude o comportamento desse tipo de fenômeno, para que futuramente possa ser criado um índice de previsibilidade, contribuindo para a minimização dos seus impactos.

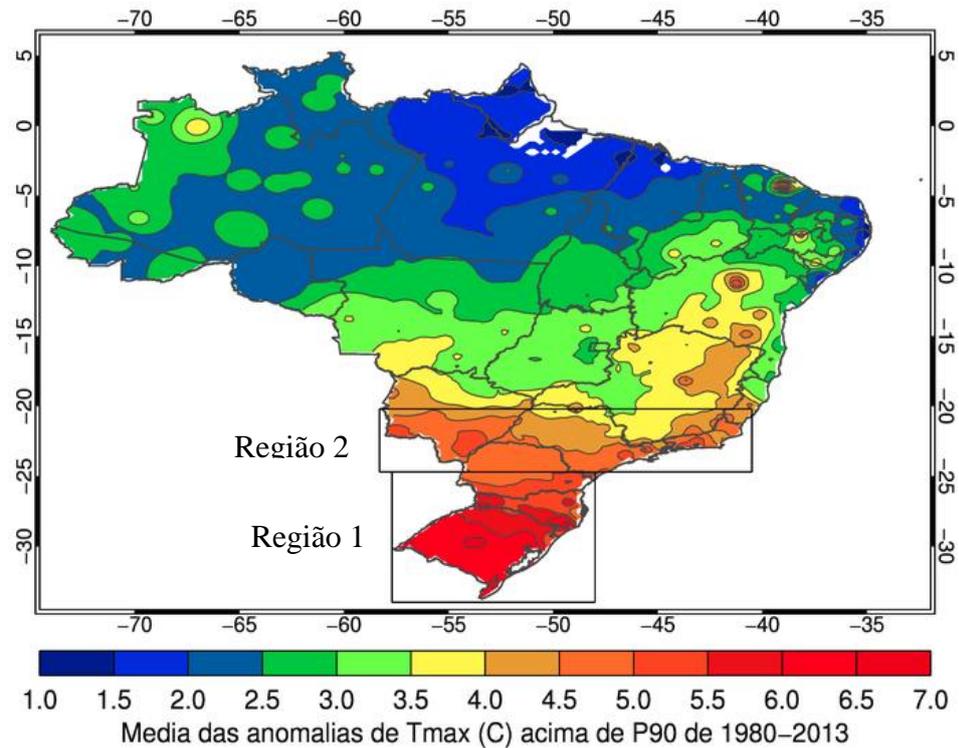


Figura 2: Média das anomalias diárias de temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ) acima do limiar de P90 no Brasil de 1980 a 2013, destacando as duas regiões de estudo.

### 3.2 DEFINIÇÃO DAS ONDAS DE CALOR

Como já citado anteriormente, ainda não existe uma única definição para determinar as ondas de calor. Neste trabalho, para que não fosse utilizado um valor arbitrário de anomalia de Tmax e persistência, foi calculado o P90 para ambas as variáveis, com o intuito de aperfeiçoar o índice que define esse tipo de fenômeno de acordo com as características de cada uma das regiões de estudo.

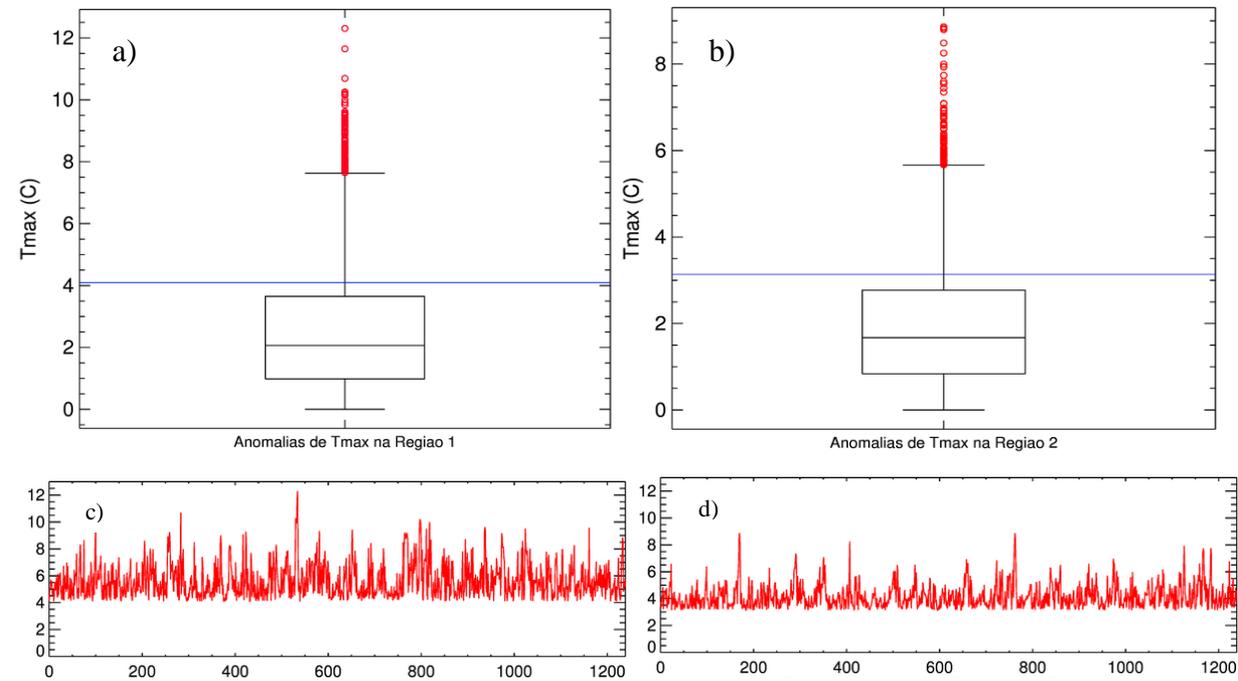


Figura 3: Box plot da distribuição das anomalias diárias de Tmax (°C) nas regiões (a) 1 e (b) 2. A linha azul na horizontal representa o percentil de 90% destas anomalias e os círculos vermelhos os valores extremos. (c) série das anomalias diárias de Tmax acima do limiar de P90 nas regiões 1 e (d) 2.

Para isto, primeiramente foram calculadas as anomalias diárias de Tmax de 1980 a 2013 para as regiões 1 e 2. Em seguida, calculou-se o valor de P90 da série temporal destas anomalias para cada região, assim foram considerados somente 10% dos valores das anomalias de cada região, ou seja, os 10% mais extremos. Na região 1, P90 corresponde aproximadamente a 4,1°C e 3,1°C na região 2. As Figuras 3 (a) e (b) mostram a distribuição das anomalias de Tmax nas duas regiões de estudo e o limiar de P90 (linha azul). Como já citado, as anomalias de Tmax consideradas neste estudo são aquelas superiores ao P90, as quais variaram entre 4,1°C e 12,3°C (valor máximo) na região 1 e entre 3,1°C e 8,8°C na região 2. Nas figuras (c) e (d) pode-se observar a série das anomalias acima de P90 para cada uma das regiões.

Em seguida, verificou-se a quantidade de dias que as anomalias de Tmax permaneceram acima do limiar proposto (Figura 4). A persistência variou de 1 a 13 na região 1 e de 1 a 15 dias na região 2. Ainda, para que fossem contabilizados apenas os eventos com anomalias mais extremas e maior persistência, calculou-se o P90 da persistência, que corresponde a 4 dias na região 1 e 6 dias na região 2. Ou seja, na região 1 os eventos duram de 4 a 13 dias, enquanto que na região 2 duram de 6 a 15 dias. Portanto, define-se aqui como onda de calor quando as anomalias de Tmax permanecem acima do limiar determinado pelo P90 das anomalias de Tmax por um período de dias superior ao P90 da persistência.

Através desta metodologia foi possível identificar o número de ondas de calor, durante os 34 anos da série temporal. Os eventos são considerados mais intensos e/ou persistentes quanto maior o valor da anomalia de Tmax e/ou persistência. Foram determinadas ainda, as variabilidades sazonal, interanual e interdecadal do fenômeno, afim de verificar em qual época do ano são mais frequentes e como suas características estatísticas, (frequência, intensidade e persistência) vêm se comportando ao longo dos anos.

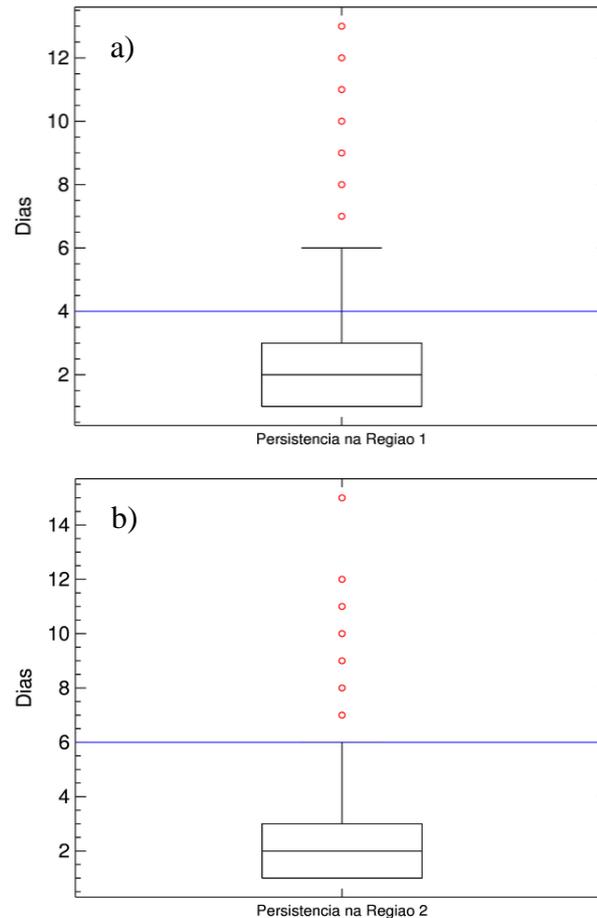


Figura 4: Box plot da distribuição da persistência (dias) de Tmax acima do limiar, nas regiões (a) 1 e (b) 2. A linha azul na horizontal representa o percentil de 90% da persistência e os círculos vermelhos os valores extremos.

### 3.3 RELAÇÃO COM A ZCAS E AAO

Além das características estatísticas, buscou-se encontrar uma relação entre as ondas de calor na região 1 e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na região sudeste do país. Para isso, foram selecionados os casos de ZCAS (cortesia de Dra. Simone Ferraz, UFSM) durante o período de 1992 a 2013 e, a partir do cálculo das anomalias diárias de Tmax em cada ponto de grade sobre o Brasil (realizado na análise preliminar) foi feita a composição defasada dessas anomalias para os 10 dias anteriores aos eventos de ZCAS e para o primeiro dia do fenômeno. Confirmada a relação entre a ZCAS e as anomalias de Tmax, contabilizou-se quantos eventos de onda de calor ocorreram durante o período em que a ZCAS se desenvolve (de outubro a março).

Por fim, a partir do índice diário da Oscilação Antártica (AAO), obtido do *Climate Prediction Center (CPC) do National Center for Environmental Prediction (NCEP)*,

calculou-se o valor médio da AAO para cada um dos eventos de ondas de calor em cada uma das regiões, separando-os na fase positiva ou negativa da oscilação. Assim, foi possível verificar a frequência de ocorrência, intensidade e persistência das ondas de calor em cada fase da AAO.

A seguir, buscou-se compreender o padrão dinâmico que relaciona os dois fenômenos. Para isto, foram utilizados dados diários de reanálise do ERA-INTERIM do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para os campos de altura geopotencial em 700 hPa e 200 hPa (resolução espacial de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ ) de 1980 a 2013. A partir destes dados foi feito o cálculo das anomalias diárias de altura geopotencial em baixos e altos níveis e, através da análise de composição defasada da média destes campos foi possível verificar as principais diferenças na atmosfera dias antes do início e durante uma onda de calor na AAO+ e AAO- para cada região.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 VARIABILIDADE DAS ONDAS DE CALOR**

A partir do cálculo do P90 das anomalias diárias de Tmax e da persistência, foram identificadas 54 ondas de calor na região 1 e 34 na região 2 entre os anos de 1980 e 2013. Primeiramente, foi feita a análise das propriedades estatísticas deste fenômeno, buscando compreender como as ondas de calor estão variando ao longo dos anos (e décadas), tanto em frequência de ocorrência, como em intensidade e persistência, além de verificar em qual época são mais frequentes.

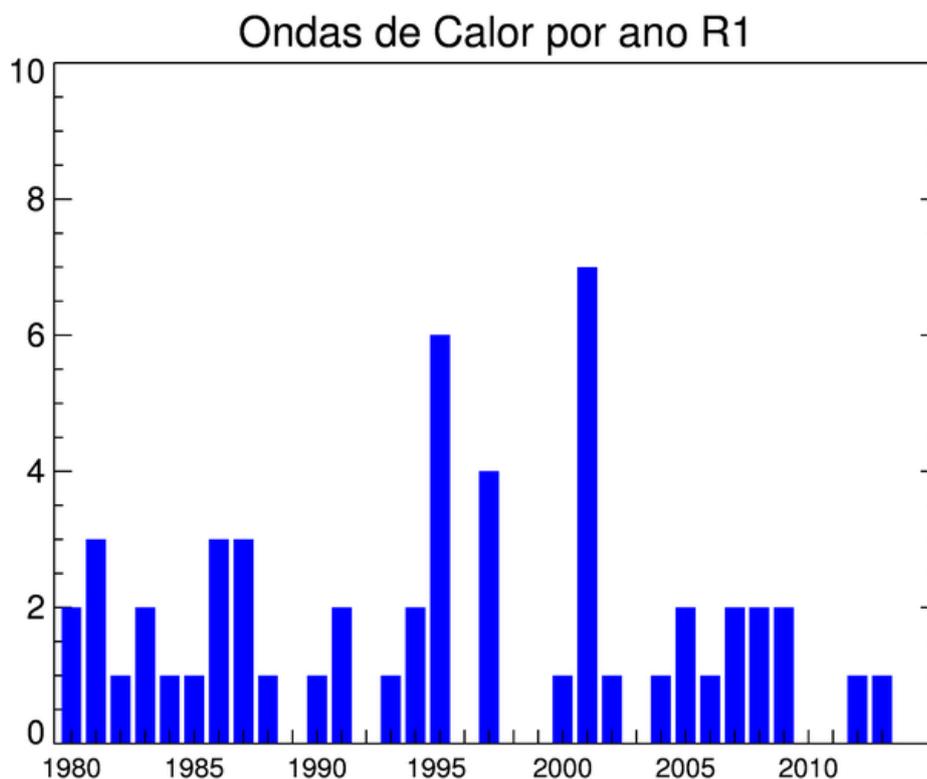


Figura 5: Número de eventos de ondas de calor por ano na Região 1.

Com este resultado pode-se observar que a região 1, a qual apresentou os valores mais extremos de anomalias (Figura 2), também apresentou maior frequência de ondas de calor do que a região 2 (Tabela 1). Conforme pode ser observado na Figura 5, nesta primeira região, os extremos quentes vêm apresentando uma frequência alta desde as décadas de 80 e 90 (ambas com 16 eventos), seguidas pelos anos 2000, em que foram contabilizados 18 eventos até 2010, totalizando 20 até 2013. Já na região 2 (Figura 6), o aumento na frequência de ocorrência desde a década de 80 (4 eventos) até os anos 90 (9 eventos) e 2000 (16) é bem mais significativo, cerca de 47% dos eventos totais (34) ocorreram nesta última década até o ano de 2010 e, totalizando 21 até o ano de 2013.

Geirinhas (2016) também encontrou um aumento na frequência desses extremos no Brasil desde a década de 80. No hemisfério Norte, Meehl et al., (2004) preveem através da modelagem, aumentos na frequência e magnitude das ondas de calor na Europa e América do Norte, principalmente a partir da segunda metade do século 21. Além disso, estudos de grande escala mostram um contínuo aumento nos extremos de temperatura em grande parte do globo (Sillmann et al., 2014).

Alguns autores (Marengo et al., 2008; Rosso et al., 2015) que analisaram o comportamento da temperatura máxima sobre a região sul do Brasil desde a década de 60, afirmam que o aquecimento mais intenso da superfície ocorreu dos anos 90 para os anos 2000. Além disso, Marengo e Camargo (2008) concluíram que o aquecimento e o aumento nos extremos de temperatura de 1980 a 2000 estão relacionados à maior frequência e intensidade de eventos de El Niño durante a década de 90.

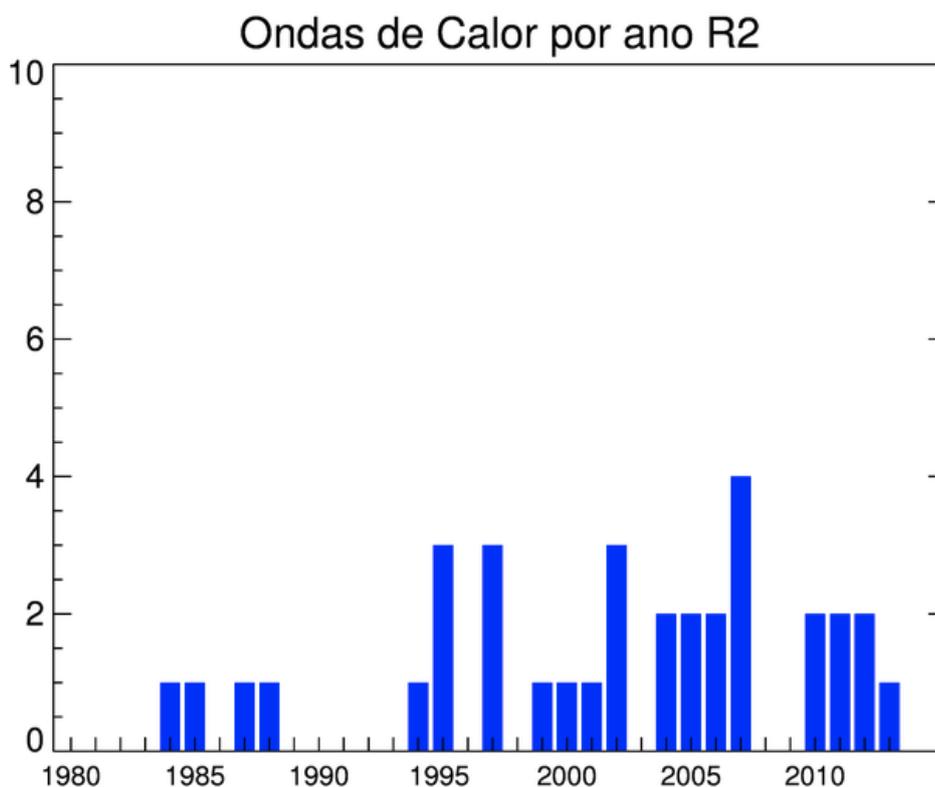


Figura 6: Número de eventos de ondas de calor por ano na Região 2.

Firpo et al., (2012) analisaram as ondas de calor no Rio Grande do Sul e sua relação com o ENOS, reforçando a teoria de que em anos de El Niño ocorre aumento na frequência das ondas de calor. Bitencourt et al., (2016), que fizeram um estudo sobre todo o domínio brasileiro, afirmam que cerca de metade dos eventos que ocorreram nos subtropicais foram em anos de El Niño. Apesar desta relação significativa, os autores também verificaram que em muitos anos que apresentaram influência de El Niño ou La Niña não ocorreram ondas de calor no Brasil.

Tabela 1 – Número de ondas de calor contabilizadas em cada região através da metodologia dos percentis.

	<b>Região 1</b>	<b>Região 2</b>
Número de Ondas de Calor	54	34
P90 Anom Tmax	4,1°C	3,1°C
Valor máximo de anom	12,3°C	8,9°C
P90 pers	4 dias	6 dias
Valor máximo da pers	13 dias	15 dias

Para verificar a variabilidade das anomalias de Tmax e da persistência dos eventos nas regiões 1 e 2 foi calculada uma média anual para ambas as variáveis. Assim, foi possível verificar que, além de mais frequentes, em geral as ondas de calor foram mais intensas e persistentes ao longo dos anos (Tabela 2). Em média, elas foram mais intensas na região 1 (Figura 7), onde as anomalias de Tmax foram mais extremas, conforme também foi observado nas Figuras 2 e 3. Em média, esta região apresentou anomalias de 5,4°C durante os eventos, enquanto que a região 2 apresentou eventos menos intensos (Figura 9), sendo a média das anomalias correspondente a 4,5°C.

Em contrapartida, na Figura 10 pode-se observar que a região 2 apresentou os eventos mais persistentes, condizente com a Figura 4. A média da persistência durante as ondas de calor na região 2 é de 8,8 dias, enquanto que na região 1 é de 6,6 dias (Figura 8). É possível que estas diferentes características entre as persistências nas duas regiões estejam associadas a diferentes mecanismos físicos, ou seja, o sistema que favorece a formação de ondas de calor na região 2 tende a ser mais persistente do que o sistema que atua sobre a região 1.

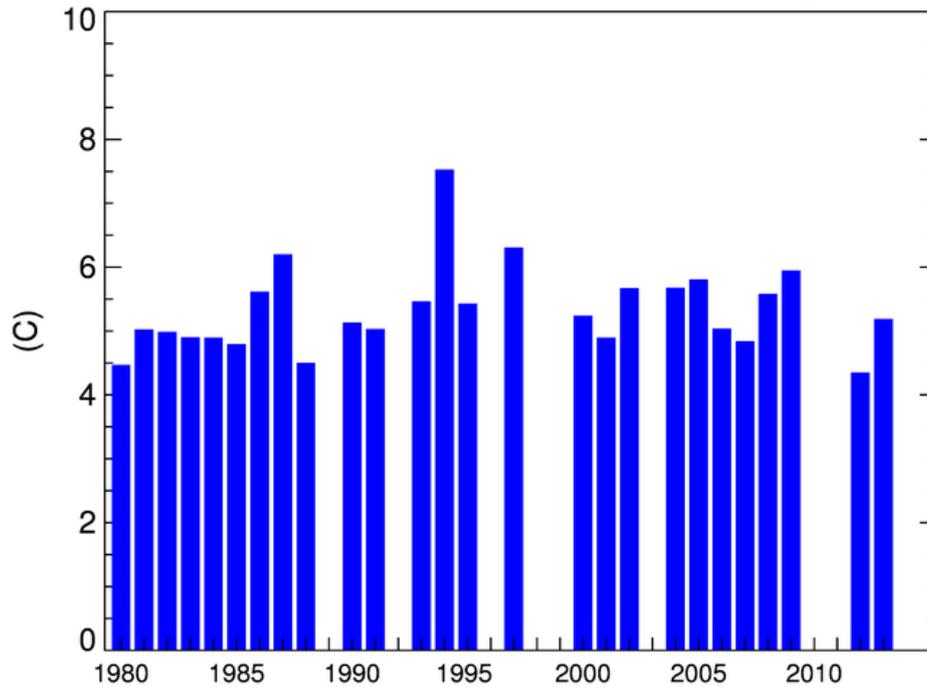


Figura 7: Média anual das anomalias de Tmax (°C) durante os eventos de onda calor na região 1.

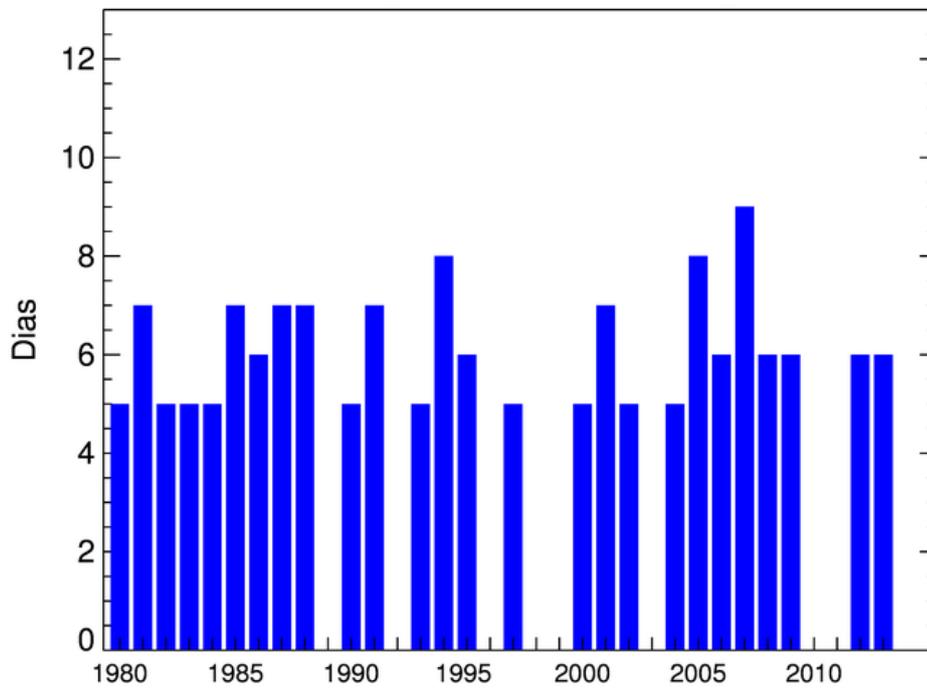


Figura 8: Média anual da persistência (dias) dos eventos de onda calor na região 1.

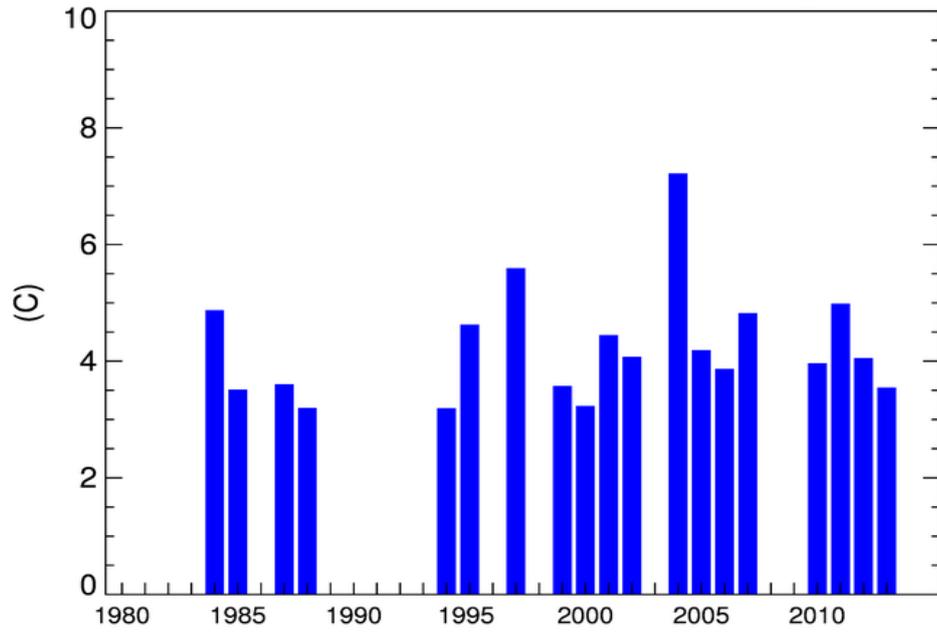


Figura 9: Média anual das anomalias de Tmax (°C) durante os eventos de onda calor na região 2.

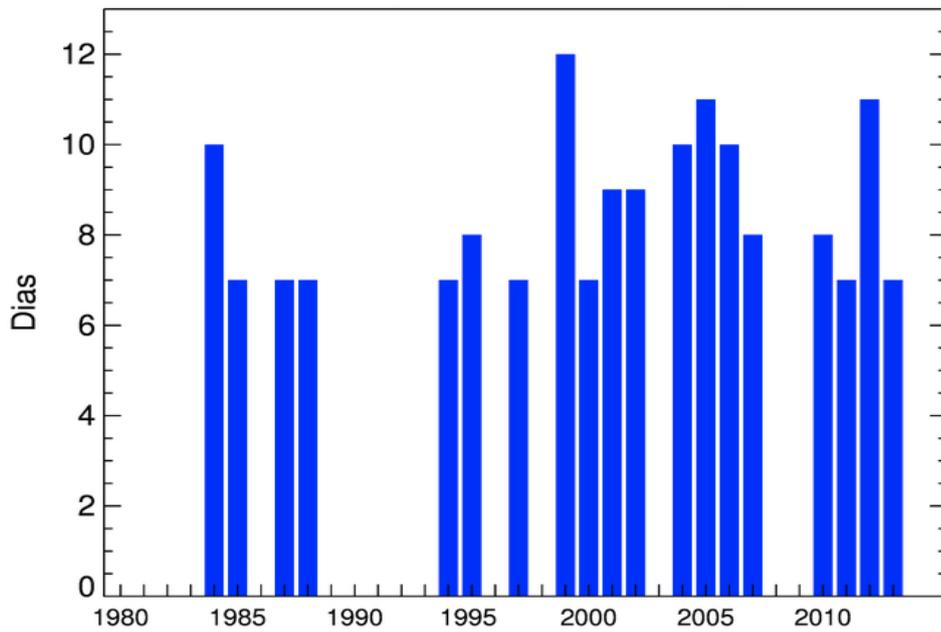


Figura 10: Média anual da persistência (dias) dos eventos de onda calor na região 2.

Tabela 2 – Número de eventos por década e média decadal da intensidade (°C) e da persistência (dias) das ondas de calor.

	<i>N° de eventos</i>		<i>Média decadal das anomalias (°C)</i>		<i>Média decadal da persistência (dias)</i>	
	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>
1981-1990	16	4	5,29	3,8	6,5	7,7
1991-2000	16	9	5,84	4,5	6,3	8,1
2001-2010	18	16	5,27	4,7	7,1	9,4

Para um melhor entendimento sobre este fenômeno, foi calculada também, a sua frequência mensal. Na figura 11 (a) e (b) pode-se observar que o mês que apresentou maior número de ondas de calor de 1980 a 2013 na região 1 foi julho, enquanto que na região 2 a maior frequência foi em setembro. No entanto, concluiu-se que, em ambas as regiões, o número de eventos é maior nos meses de inverno (Tabela 3), seguidos da primavera, outono e, por último, os meses de verão.

Apesar de as ondas de calor serem mais frequentes no inverno, a sua ocorrência no verão traz maior desconforto para a população, tendo em vista que uma anomalia de menor amplitude somada a uma temperatura mais elevada causa mais impactos. Já o grande número de ondas de calor encontradas no inverno, pode estar associado a eventos quentes, conhecidos como “veranicos”, os quais não trazem tanto desconforto para a população como os eventos que ocorrem no verão.

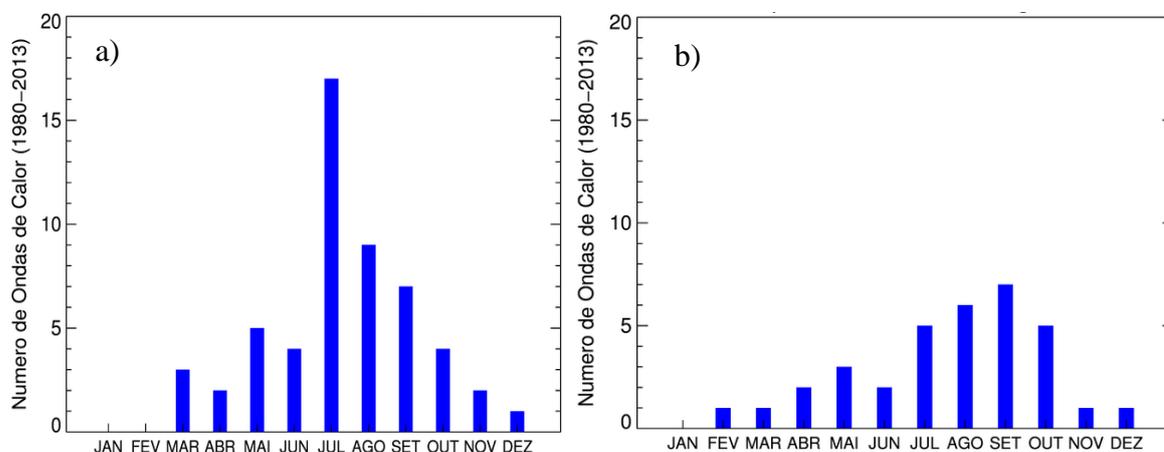


Figura 11: Frequência mensal das ondas de calor de 1980 a 2013 nas regiões (a) 1 e (b) 2.

Firpo et al., (2012) e Geirinhas (2016) também encontraram uma frequência maior durante o inverno, meses em que a amplitude térmica é mais elevada. Os autores afirmam ainda, que esta característica sazonal é devido a atmosfera estar mais instável e sujeita a mudanças de temperatura neste período do ano. Este resultado está de acordo com alguns autores (Damião et. al., 2005; Oliveira, 2011), que afirmam que os bloqueios atmosféricos no Pacífico Sul são mais frequentes e persistentes durante o inverno, seguido pelo outono, e menos frequentes no verão. Durante o inverno, a corrente de jato, que atua como guia de onda, está mais próxima do Equador, podendo enfraquecer os ventos de oeste nos extratropicais, o que leva a uma amplificação e mais lenta propagação das ondas de Rossby, favorecendo a formação de bloqueios neste período.

Tabela 3 – Frequência sazonal das Ondas de Calor nas regiões 1 e 2 de 1980 a 2013.

	<b>Nº de eventos Região 1</b>	<b>Porcentagem (%)</b>	<b>Nº de eventos Região 2</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Verão	1	1,8	2	5,9
Outono	10	18,5	6	17,7
Inverno	30	55,6	13	38,2
Primavera	13	24,1	13	38,2

#### 4.2 RELAÇÃO COM A ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL

Durante os meses de outubro a março, observa-se uma banda de nebulosidade convectiva, com orientação noroeste-sudeste, sobre a região sudeste do Brasil, conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a qual desempenha um importante papel no regime de chuvas desta região. Cerne e Vera (2010) estudaram a influência da ZCAS no desenvolvimento das ondas de calor nos subtropicais da América do Sul. Os autores concluíram que 73% dos casos de ondas de calor ocorrem em associação com uma ZCAS ativa.

Assim, esta seção pretende analisar o comportamento das anomalias diárias de temperatura máxima na região subtropical do Brasil durante os eventos de ZCAS de 1992 a 2013 no Sudeste e verificar quantas ondas de calor ocorreram no seu período característico.

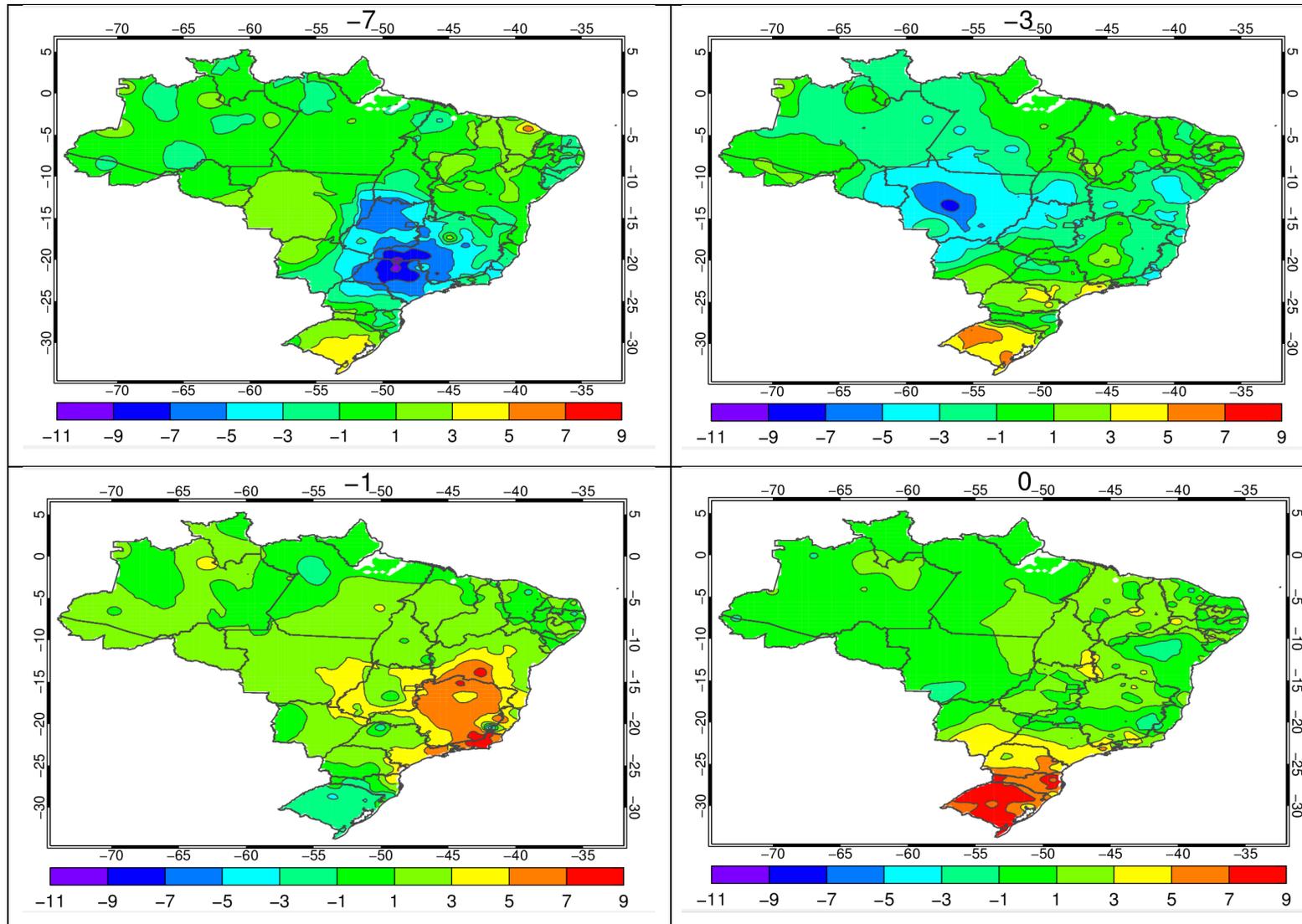
Para isto, foi feita uma análise da composição defasada dessas anomalias de Tmax para os 10 dias anteriores aos eventos de ZCAS e para o primeiro dia do fenômeno.

Cerne e Vera (2010) afirmam que durante as semanas que precedem o desenvolvimento da onda de calor, uma ZCAS fica evidentemente intensificada ao longo da região sudeste da América do Sul. No Quadro 1, observa-se a composição das anomalias diárias de Tmax. No *lag -7*, ou seja, sete dias antes do início da ZCAS, as regiões sudeste e centro-oeste do Brasil apresentaram valores de temperatura máxima entre 3°C e 11°C abaixo da média climatológica. Já na região Sul, as anomalias de temperatura são positivas, entre 1°C e 3°C acima da média.

Essas anomalias positivas ao sul da posição da ZCAS se tornam mais intensas, entre 3°C e 5°C acima da média, nos dias mais próximos ao início do fenômeno (*lag -3*), enquanto as anomalias negativas no Sudeste enfraquecem até se tornarem positivas. No dia anterior ao início da ZCAS (*lag -1*), as anomalias de temperatura máxima ficaram entre 1°C e 7°C acima da média no Sudeste e Centro-Oeste, favorecendo o movimento ascendente e, conseqüentemente, a convecção.

No primeiro dia da ZCAS (*lag 0*), considerado como o primeiro dia da convecção, as anomalias de temperatura máxima diminuíram na região de atuação do fenômeno, em comparação com o *lag -1*, devido à baixa incidência de radiação de onda longa (OLR). Em contrapartida, as anomalias se tornam bastante intensas na região Sul, com valores entre 3°C e 7°C acima da média climatológica. Assim, pode-se afirmar que a intensificação da ZCAS favorece o aumento da temperatura nas regiões subtropicais.

Este aquecimento mais intenso da região subtropical pode ser relacionado a um padrão dipolo, com o centro de baixa pressão localizado sobre a posição climatológica da ZCAS e uma alta quase estacionária localizada ao sul. Os sistemas de alta pressão, como já citado anteriormente, favorecem a subsidência, podendo gerar intensas anomalias de Tmax que, devido ao céu claro, são acompanhadas por anomalias positivas de OLR. Assim, dependendo da sua persistência acima da média, estas anomalias levam à configuração de ondas de calor.



Quadro 1: Composição defasada das anomalias diárias de temperatura máxima para os dias anteriores aos eventos de ZCAS de 1992 a 2013. O lag -7 representa as anomalias 7 dias antes do início da ZCAS e assim por diante, até o primeiro dia do fenômeno (lag 0).

Além da subsidência, a evolução temporal do padrão dipolo apresentado por Cerne et al., (2010) mostra que um dia antes e no primeiro dia das ondas de calor, a elevação da temperatura ocorre principalmente devido à advecção de calor e umidade de norte até a região de interesse. Desta forma, torna-se evidente o importante papel dinâmico da ZCAS ativa sobre as anomalias de temperatura máxima na região subtropical do Brasil.

Após confirmada a relação da ZCAS com as anomalias de temperatura nos subtrópicos, foi verificado quantas ondas de calor ocorreram no período em que a ZCAS se desenvolve (de outubro a março). No entanto, houveram apenas 4 eventos de ondas de calor, entre 1992 e 2013 que ocorreram durante estes meses. Isto, provavelmente, se deve ao fato de que as ondas de calor apresentaram uma baixa frequência durante estes meses, ou seja, é claro o fato de que a ZCAS favorece o aumento da temperatura nos subtrópicos, no entanto, as anomalias não devem persistir o período mínimo para serem consideradas onda de calor.

#### 4.3 RELAÇÃO COM A OSCILAÇÃO ANTÁRTICA

A Oscilação Antártica (também conhecida como Modo Anular Sul-SAM) vem sendo citada na literatura como um dos mais importantes padrões de variabilidade climática de grande escala atuante nos extratropicos do Hemisfério Sul (Oliveira et al., 2016). Este padrão se caracteriza por apresentar um trem de ondas zonalmente simétrico no campo de altura geopotencial em 700 hPa sobre médias e altas latitudes. Além disso, possui duas fases, uma positiva e outra negativa, em que a circulação se comporta de maneira oposta. A fase positiva é caracterizada por uma queda na pressão em superfície e altura geopotencial em 700 hPa sobre a Antártica, enquanto que em médias latitudes ocorre um aumento da pressão ao nível do mar e altura geopotencial. O contrário ocorre na fase negativa.

Sabendo que o comportamento de sistemas sinóticos no Hemisfério Sul, principalmente ciclones e anticiclones nos extratropicos, está fortemente associado à variabilidade climática em larga escala (Pezza et al., 2012), é possível uma fase particular dos modos climáticos aumentar a probabilidade de ocorrência de ondas de calor. Estes eventos extremos podem se tornar mais graves ainda quando outros mecanismos de escala de tempo mais curtos ocorrem concomitantemente (Perkins et al., 2016). Desta forma, o objetivo desta seção é relacionar as características estatísticas das ondas de calor com as fases positiva e negativa da AAO e verificar os padrões no campo de altura geopotencial em 700 hPa e 200 hPa.

Para a classificação das ondas de calor em fase positiva ou negativa, foi calculada uma média da AAO para cada evento de onda de calor nas regiões 1 e 2. Dos 54 eventos que ocorreram na região 1, 20 foram na AAO+ e 34 na AAO-. A região 2 apresentou o mesmo padrão, maior frequência de eventos na fase negativa: 8 na AAO+ e 26 na AAO-. Foi verificado ainda, em qual fase os eventos foram mais intensos e/ou persistentes.

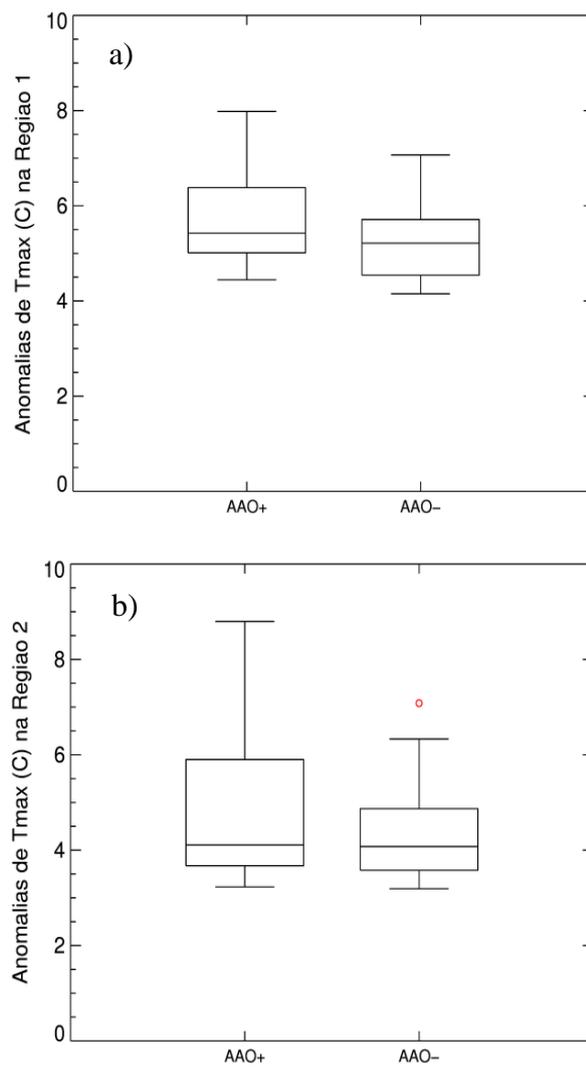


Figura 12: Box plot das anomalias de Tmax nas regiões (a) 1 e (b) 2 em cada fase da AAO.

As Figuras 12 e 13 ilustram, respectivamente, a distribuição das anomalias diárias de Tmax e da persistência dos eventos de onda de calor em cada fase da AAO nas regiões 1 e 2. Em média, os valores de anomalia e persistência são bem próximos, no entanto, na Figura 12 pode-se observar que nas duas regiões a amplitude das anomalias é maior na AAO+ e, em

média, os eventos são ligeiramente mais intensos nesta fase. Já na Figura 13, é possível notar que a persistência dos eventos tem uma amplitude um pouco mais elevada na AAO-.

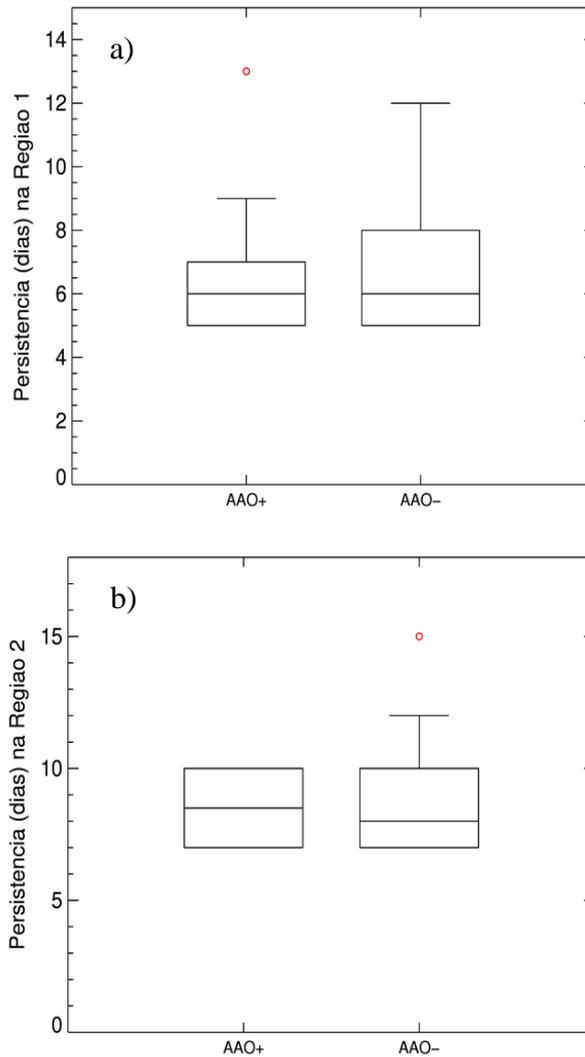


Figura 13: Box plot da persistência das ondas de calor nas regiões (a) 1 e (b) 2 em cada fase da AAO.

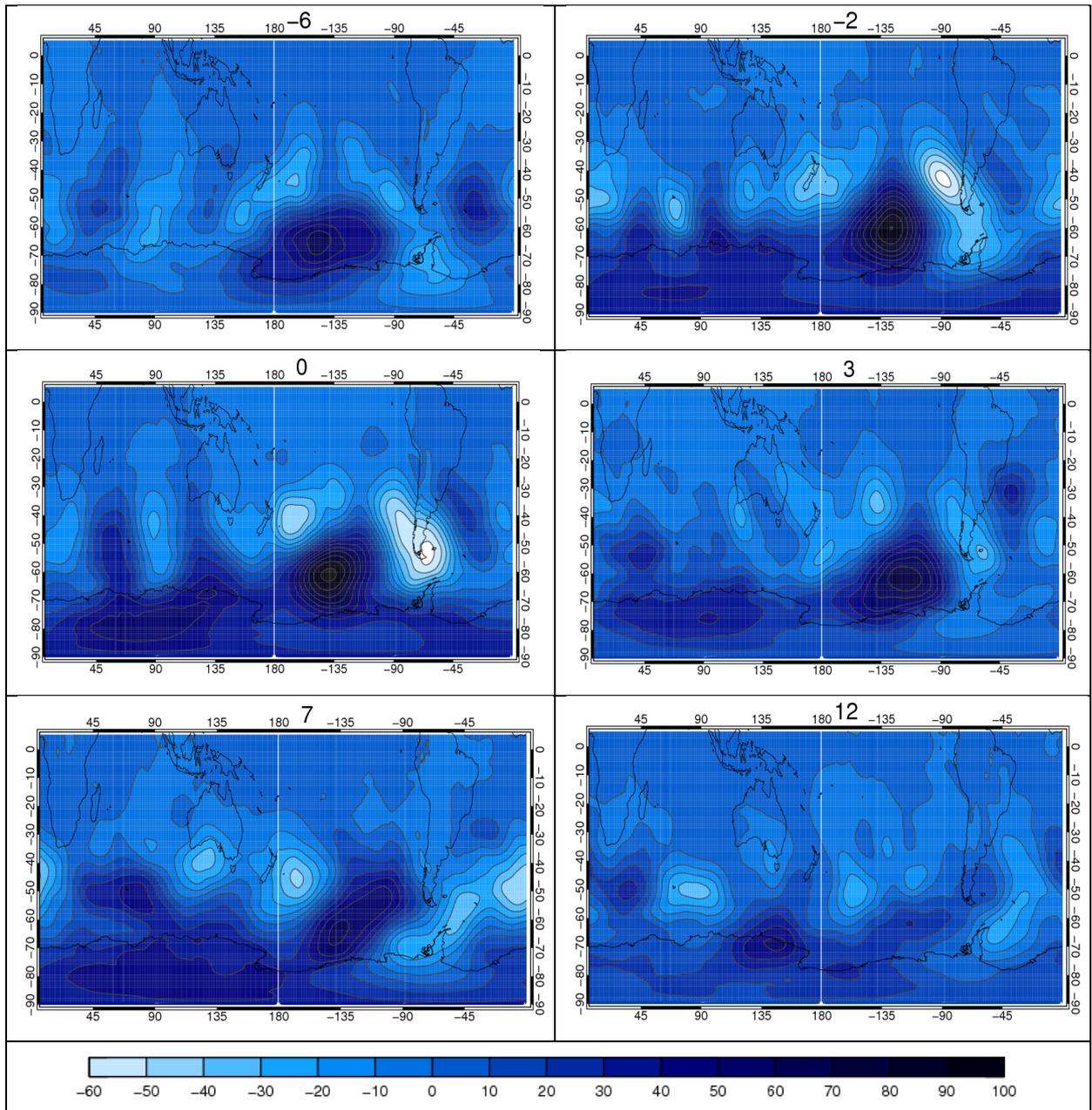
Resultados encontrados na literatura (Oliveira et al., 2016) mostram uma frequência condizente para os bloqueios atmosféricos no HS. Os autores estudaram como a combinação entre as fases do ENOS podem influenciar os bloqueios na região subtropical e constataram que uma fase neutra do ENOS combinada com a AAO+ aumenta a frequência de bloqueios na porção SW do oceano Pacífico. Já o ENOS neutro combinado com a AAO-, favorece a formação de bloqueios na região SE do Pacífico, a qual tem influência sobre as latitudes

subtropicais do Brasil. Com a maior frequência de bloqueios nesta fase (AAO-), aumenta a probabilidade de ocorrência de ondas de calor nas regiões aqui estudadas.

Para uma melhor compreensão destes resultados, foi feita uma análise de composição defasada entre as ondas de calor de 1980 a 2013 em cada fase da AAO, tanto na região 1 como na região 2 e as anomalias nos campos de altura geopotencial em 700 hPa e 200 hPa, possibilitando verificar as principais diferenças no comportamento da atmosfera tanto nos dias que precedem o início de uma onda de calor em cada fase da AAO, como durante o período de atuação do fenômeno.

Os Quadros 2 e 3 apresentam a composição defasada das anomalias diárias de altura geopotencial em 700 hPa durante as ondas de calor que ocorreram na região 1 nas fases negativa e positiva da AAO, respectivamente. No *lag* -6 da fase negativa (Quadro 2), ou seja, 6 dias antes do início das ondas de calor, já é possível visualizar o estabelecimento de anomalias positivas de altura geopotencial com centro aproximadamente em 135°W. O padrão de anomalias positivas é estacionário e vem acompanhado por duas células com anomalias negativas de altura geopotencial, caracterizando um bloqueio do tipo ômega (invertido no HS). Com o passar dos dias, os sistemas se intensificam, como pode ser observado nos *lag* -2 e *lag* 0 (primeiro dia das ondas de calor).

No *lag* -2, deve ser destacado ainda, que as anomalias positivas sobre o Atlântico Sul se aproximam do continente, padrão semelhante ao encontrado por Cerne e Vera (2010). A atuação em conjunto deste sistema próximo a região sudeste e das anomalias negativas de altura geopotencial sobre o sul do continente, canalizam um ar mais quente e úmido para as regiões subtropicais. No *lag* 3 verifica-se uma desintensificação do padrão de bloqueio, no entanto a intensificação das anomalias positivas sobre o Atlântico continua mantendo as temperaturas elevadas, devido à advecção. 7 dias após o início do evento o bloqueio começa a se desconfigurar, é possível observar um pequeno avanço dos sistemas, e com 12 dias o padrão está totalmente rompido.

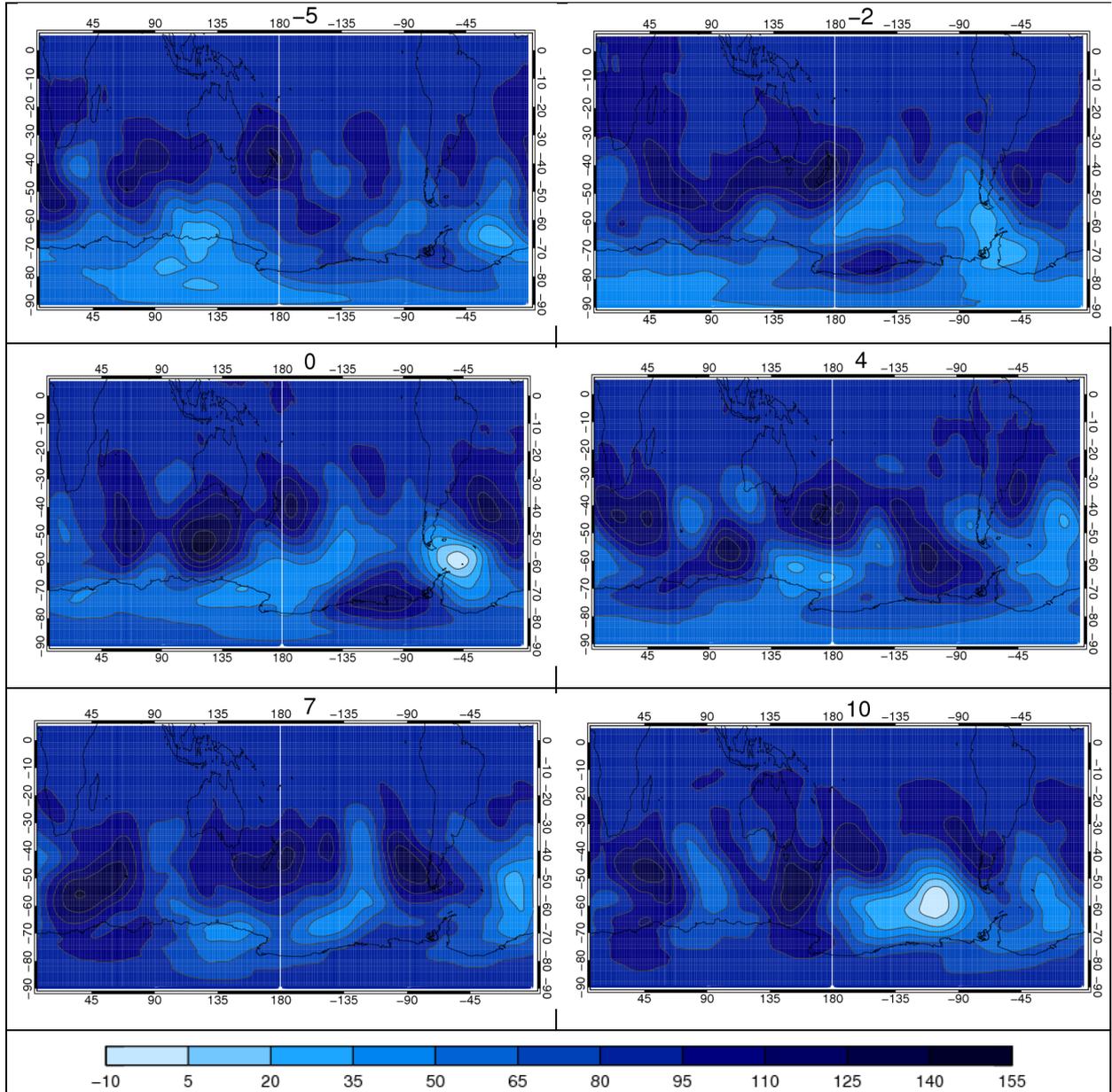


Quadro 2: Composição defasada da das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa durante as ondas de calor que ocorreram na região 1 durante AAO-.

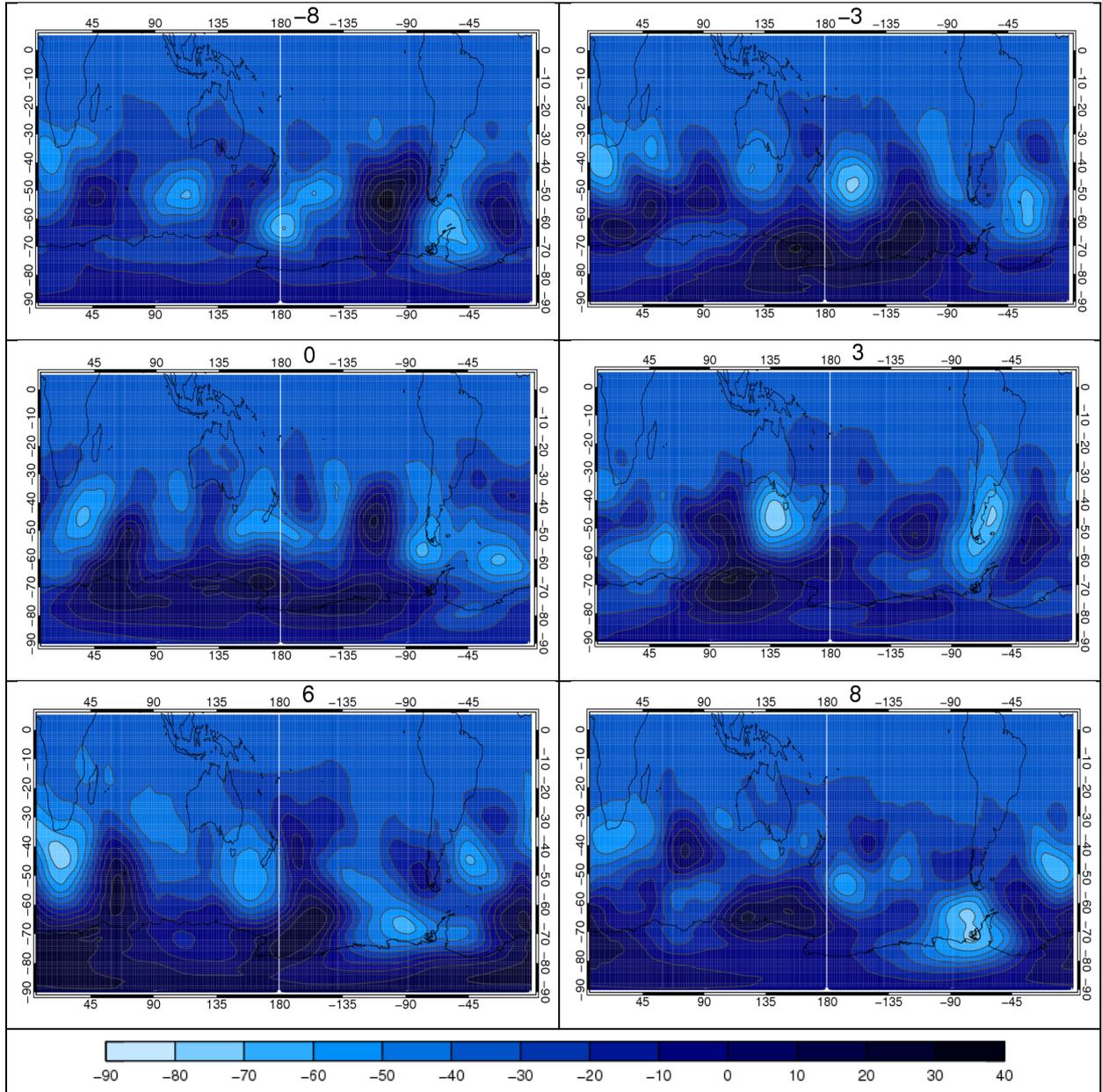
No Quadro 3, o padrão das anomalias de altura geopotencial para a fase positiva da AAO apresenta valores mais elevados e se comporta de forma diferente da fase negativa. Nos dias anteriores ao evento, pode-se notar a presença de anomalias positivas de altura geopotencial sobre o Atlântico Sul (*lag* -5) e anomalias negativas de altura geopotencial no extremo sul da América do Sul (*lag* -2). Porém somente um dia antes ao evento ocorre a aproximação da alta, se estabelecendo no SE do Pacífico no primeiro dia do evento. Neste caso, as anomalias sobre o Atlântico se intensificam entre os *lag* 0 e 4 desempenhando um importante papel na advecção de temperatura juntamente com o centro de anomalias negativas. O padrão perde força somente a partir do quinto dia do evento, quando o centro de anomalias negativas começa a se afastar do continente e um novo centro com anomalias positivas se aproxima. No *lag* 10 já há a atuação de outro sistema sobre a América do Sul, logo esta fase apresenta os eventos menos persistentes, em acordo com o resultado apresentado anteriormente.

Para a região 2 (Quadro 4), o comportamento da atmosfera nos dias anteriores e durante as ondas de calor é bastante parecido, porém menos persistente, do que o observado na AAO- na região 1. No *lag* - 8 já é possível observar o estabelecimento de um centro de anomalias positivas de altura geopotencial, impedindo a progressão normal do escoamento de oeste. No *lag* 0, estas anomalias positivas estão mais intensas e as anomalias positivas sobre o Atlântico se aproximam do continente. Nos dias seguintes, o centro de anomalias negativas localizado mais ao sul se intensifica e, juntamente com as anomalias positivas, advecta ar mais quente e úmido para a região 2. No *lag* 6, já ocorre a dissipação do padrão de bloqueio e, conseqüentemente, o avanço de novos sistemas em direção ao continente.

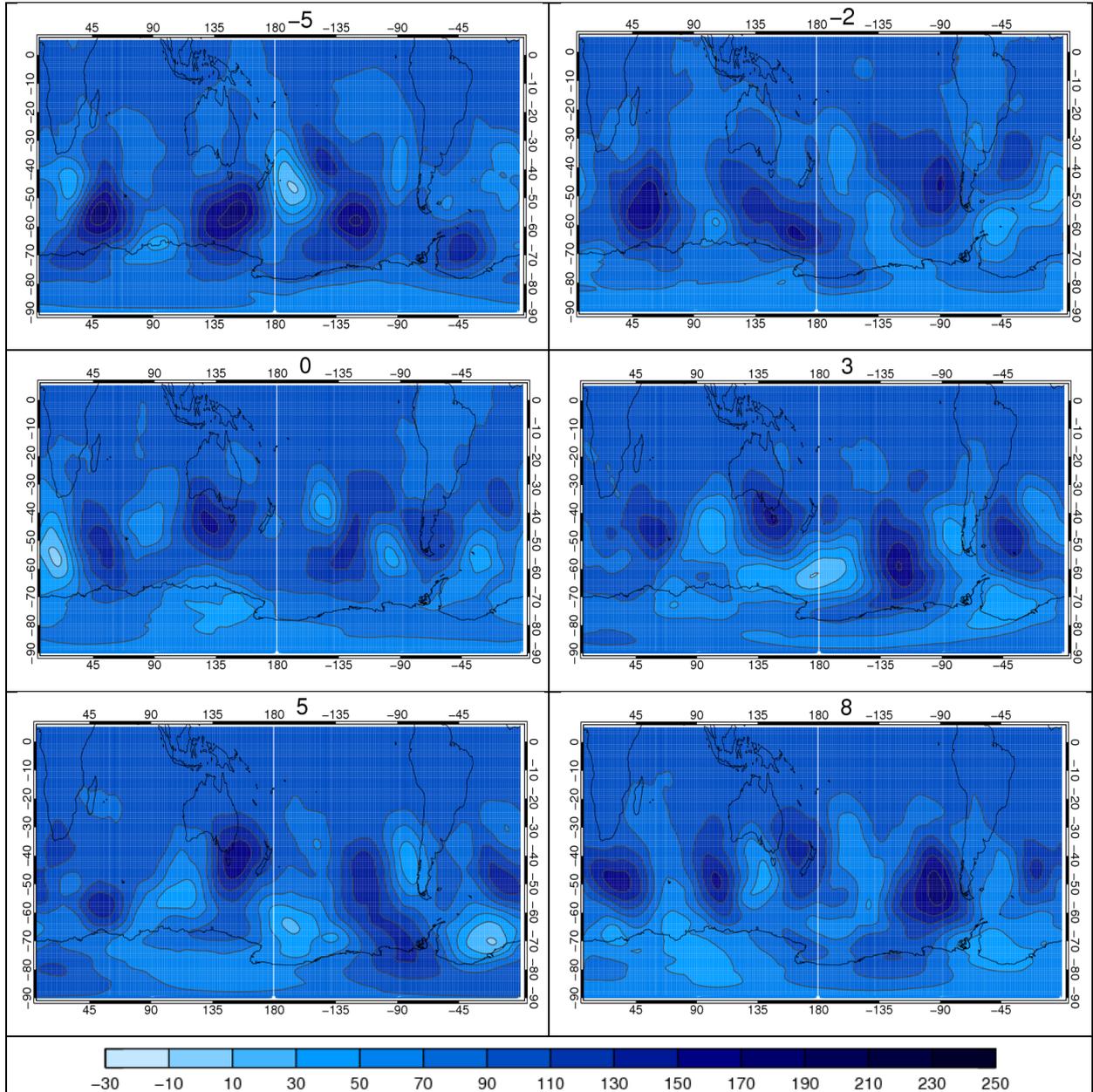
Para a AAO+ (Quadro 5), é possível observar o avanço do fluxo zonal de oeste (entre os *lag* -5 e o -2). Neste caso, não há um padrão estacionário configurado na atmosfera, porém a influência de anomalias positivas sobre o Atlântico leva à prevalência do fluxo de norte. Além disso, no decorrer dos dias o aquecimento persistente pode ser justificado pela atuação em conjunto das anomalias positivas com o centro de anomalias negativas localizado um pouco mais a oeste (*lag* 3). No *lag* 5 as anomalias positivas já se afastam do continente. Por não haver um padrão estacionário, neste caso as ondas de calor são menos persistentes do que nos demais.



Quadro 3: Composição defasada das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa durante as ondas de calor que ocorreram na região 1 durante AAO+.

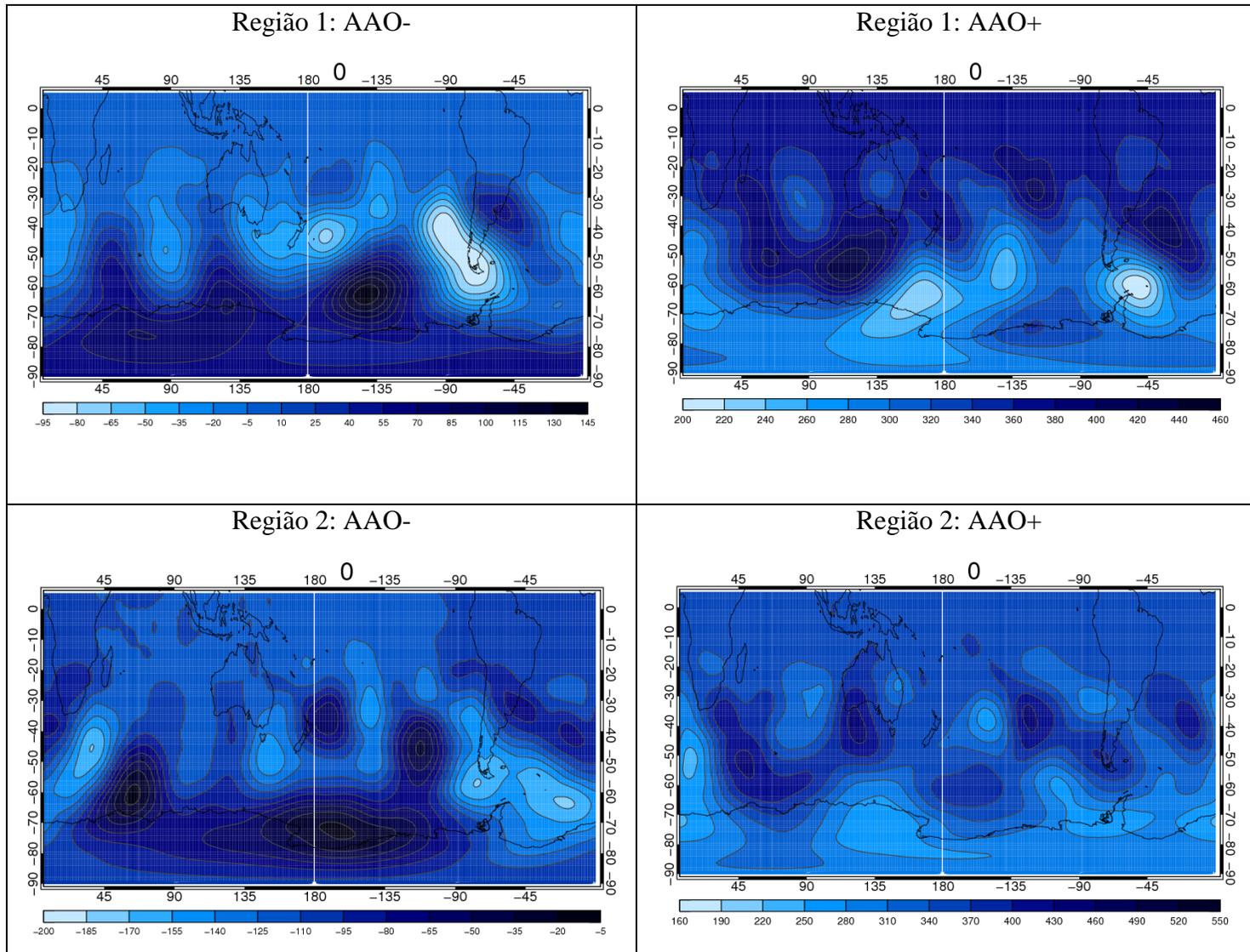


Quadro 4: Composição defasada das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa durante as ondas de calor que ocorreram na região 2 durante AAO-.



Quadro 5: Composição defasada das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa durante as ondas de calor que ocorreram na região 2 durante AAO+.

A mesma análise realizada para baixos níveis foi feita também para a alta troposfera, aqui serão mostradas as figuras do primeiro dia das ondas de calor em cada um dos casos, tendo em vista que os dias restantes apresentaram o mesmo padrão. O Quadro 6, mostra o comportamento das anomalias de altura geopotencial em 200 hPa durante o primeiro dia das ondas de calor na AAO- e AAO+ em cada uma das regiões. Neste caso, foi constatado o mesmo padrão que o observado em 700 hPa, mostrando que os centros de anomalias positivas e negativas de altura geopotencial estão verticalmente alinhados em altos e baixos níveis, caracterizando um comportamento barotrópico destes sistemas.



Quadro 6: *Lag 0* da composição defasada das anomalias de altura geopotencial em 200 hPa durante as ondas de calor que ocorreram na região 1 (quadros superiores) e região 2 (quadros inferiores) durante AAO- e AAO+.

## 5 CONCLUSÕES

Apesar do crescente debate sobre o aquecimento global, alguns estudos afirmam que houve uma queda na taxa de aquecimento desde o final da década de 90 (1999-2013) (Meehl et al., 2011; Trenberth et al., 2013). Avaliar se há ou não um hiato no aquecimento global vai além dos objetivos propostos neste trabalho. No entanto, tendo em vista que diversos autores (Perkins et al., 2012; Seneviratne et al., 2014; Sillmann et al., 2014) afirmam que houve um aumento global na frequência, intensidade e persistência dos extremos quentes no período que corresponde ao suposto hiato, propôs-se analisar a variabilidade e características estatísticas das ondas de calor em duas regiões dos subtropicais do Brasil de 1980 a 2013.

A partir da metodologia proposta, foram contabilizadas 54 ondas de calor na região 1 e 34 na região 2. A região 1, que apresentou maior frequência de eventos durante o período da análise, também apresentou valores mais altos de anomalias de temperatura. Além disso, nesta região os eventos vêm sendo frequentes desde a década de 80, enquanto que na região 2 se tornaram mais frequentes a partir de meados da década de 90. Foram verificadas ainda, a intensidade e a persistência dos eventos, de acordo com a média anual calculada para estas variáveis. Em ambas as regiões se observa um aumento na intensidade e persistência destes eventos ao longo dos anos.

Os resultados mostraram que de maneira geral, os extremos quentes apresentaram uma tendência positiva, tanto em frequência como em magnitude, resultado que está de acordo com diversos estudos que confirmam um aumento em escala global nesses extremos, incluindo Geirinhas (2016) e Bitencout et al., (2016) que encontraram resultados da mesma ordem para todo o domínio brasileiro. Além disso, constatou-se que as ondas de calor são mais intensas na região 1, já que as anomalias de Tmax foram mais intensas, porém mais persistentes na região 2, o que possivelmente está associado a diferentes mecanismos físicos que levam à formação das ondas de calor em cada região.

Outra característica que pôde ser constatada, é que as ondas de calor apresentam uma frequência maior no período do inverno em ambas as regiões, ao contrário do que o nome do evento sugere. No entanto, este resultado deve ser associado ao fato de que os bloqueios atmosféricos também ocorrem com maior frequência neste período. Estes bloqueios levam a um rompimento do padrão zonal da circulação, impedindo a progressão normal dos sistemas sinóticos. Esse tipo de configuração na atmosfera pode favorecer o aumento da temperatura e, dependendo da sua persistência, levar à formação das ondas de calor.

Para entender melhor como este tipo de fenômeno varia, é importante estudar a relação dos mesmos com variabilidades climáticas de mais alta frequência, como a intra-sazonal. Portanto, um dos objetivos aqui propostos foi verificar a relação entre a ZCAS e as anomalias de Tmax nos subtropicais durante o período de 1992 a 2013. Esta análise, mostrou que, a intensificação da ZCAS na região Sudeste, favorece o aumento de temperatura mais ao sul. Isto ocorre devido ao estabelecimento de um padrão dipolo, como um sistema de baixa pressão na posição climatológica da ZCAS, favorecendo a convecção na região, e um sistema de alta pressão no lado polar do mesmo.

Este sistema de alta pressão é responsável pelo ar subsidente que estabiliza a atmosfera na região, aumentando a quantidade de radiação incidente e elevando a temperatura. Além disso, este mesmo sistema, advecta ar quente e úmido de latitudes mais elevadas, favorecendo ainda mais o aumento de temperatura. É evidente o papel significativo desta variabilidade intra-sazonal na temperatura e no padrão dinâmico da atmosfera nos subtropicais, no entanto, foram verificados somente 4 eventos de ondas de calor durante o período que a ZCAS se ativa (outubro-março). Acredita-se que este resultado seja devido à baixa frequência das ondas de calor nestes meses. Além disso, o que pode ocorrer é o aumento na temperatura máxima nos subtropicais, mas sem ultrapassar a persistência determinada por P90 para estas anomalias serem consideradas onda de calor.

É importante também, relacionar as ondas de calor com padrões globais de teleconexão, tendo em vista que o comportamento de sistemas sinóticos no HS, como ciclones e anticiclones, está fortemente associado à variabilidade climática em larga escala. Como a Oscilação Antártica é uma das variabilidades mais importantes que atua nos extratropicais, investigou-se a relação entre suas fases positiva e negativa, e as características estatísticas das ondas de calor.

Com isso, obteve-se que a maior frequência e persistência das ondas de calor ocorreram na fase negativa da oscilação. Resultado que está de acordo ao encontrado por Oliveira et al., (2016), que verificaram um aumento na frequência de episódios de bloqueio nesta mesma fase. Na AAO-, há um enfraquecimento dos ventos de oeste, o que gera amplificação das cristas e cavados e favorece a formação de bloqueios. Quanto à intensidade das ondas de calor, foi maior na fase positiva para ambas as regiões.

Através da análise de composição defasada entre os eventos de ondas de calor nas duas fases da AAO e as anomalias de altura geopotencial em 700 hPa e 200 hPa, observou-se o mesmo padrão dos sistemas em baixos e altos níveis, ou seja, os sistemas estão verticalmente alinhados, mostrando um caráter barotrópico-equivalente. Além disso, ambas as

regiões apresentaram um comportamento semelhante, mas padrões diferentes em cada fase. Na fase negativa, é possível observar um bloqueio no escoamento zonal de oeste, favorecendo condições persistentes nas regiões de estudo. É possível identificar também, que as anomalias positivas de altura geopotencial sobre o oceano Atlântico se aproximam da porção leste do continente sul americano, favorecendo o fluxo de norte e, conseqüentemente, o aquecimento. Já na fase positiva, há um predomínio da influência das anomalias positivas sobre o leste do continente desde os dias que antecedem as ondas de calor. No decorrer dos dias, este sistema se intensifica e, juntamente com as anomalias negativas no extremo sul, contribuem para a advecção de ar quente na região de estudo.

Através dos resultados obtidos nesta pesquisa, fica claro que as regiões subtropicais vêm sendo atingidas por ondas de calor cada vez mais frequentes, intensas e persistentes. Este aumento nos extremos de temperatura é justificado pelo aquecimento global, desde a década de 80. No entanto, as variabilidades naturais do clima também têm uma forte influência sobre estes extremos de temperatura. Assim, espera-se que as relações com a ZCAS e AAO aqui obtidas possam contribuir com a comunidade científica para um pequeno avanço em direção à previsibilidade destes eventos extremos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRIZZI, T.; MARQUES, R.; NASCIMENTO, E. **Bloqueios Atmosféricos**. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Organizadores). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina M. G. A. de Textos, 2009.

BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; MAIA, P. A.; AMORIM, F. T. **Frequência, Duração, Abrangência Espacial e Intensidade das Ondas de Calor no Brasil**. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 31: 506-517, 2016.

CECCHERINI, G.; RUSSO, S.; AMEZTOY, I.; ROMERO, C. P.; MORENO, C. C. **Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: the case of South America**. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 821–831, 2016.

CERNE, S. B.; VERA, C. S. **Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America**. *Climate Dynamics*. 36: 2265-2277, 2010.

CLARK, R. T.; BROWN, S. J.; MURPHY, J. M. **Modeling Northern Hemisphere summer heat extreme changes and their uncertainties using a physics ensemble of climate sensitivity experiments**. *J. Clim.* 19: 4418-4435, 2006.

CLEMENT, A. C.; DINEZIO, P. **Tropical Pacific Ocean: Back in the Drivers Seat?** *Science*. 343: 976-978, 2014.

COUGHLAN, M. J. **A comparative climatology of blocking action in the two hemispheres**. *Aust. Met. Mag.* 31: 3-13, 1983.

COWTAN, K.; WAY, R. G. **Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends**. *Q. J. Roy. Met. Soc.* 140: 1935-1944, 2014.

DAMIÃO, M. C. M. **Bloqueios atmosféricos de 1960 a 2000 sobre o oceano Pacífico Sul: impactos climáticos e mecanismos físicos associados**. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 20: 175-190, 2005.

DAMIÃO, M. C. M. **Blocking Episodes in the Southern Hemisphere: Impact on the Climate of Adjacent Continental Areas**. *Pure and Applied Geophysics*. 165: 1-22, 2008.

FIRPO, M. A. F.; SANSIGOLO, C. A.; ASSIS, S. V. **Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS**. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 27, 95-106, 2012.

GEIRINHAS, J. L. M. **Caracterização Climática e Sinóptica das Ondas de Calor no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas) - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Cambridge, Cambridge University, 2014.

KARL, T. R.; ARGUEZ, A.; HUANG, B.; LAWRIK, J. H.; MENNE, M. J.; PETERSON, T. C.; VOSE, R. S.; ZHANG, H.-M. **Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus.** *Science* 348, 1469, 2015.

MARENGO, J.A.; CAMARGO, C.C. **Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002.** *International Journal of Climatology*. 28, 893-904, 2008.

MARQUES, R. F. **Bloqueios Atmosféricos no Hemisfério Sul.** Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1996.

MEEHL, G. A.; ARBLASTER, J. M.; FASULLO, J. Y.; HU, A.; TRENBERTH, K. E. **Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the interdecadal Pacific oscillation.** *J. Climate*, 26: 7298–7310, 2013.

MEEHL, G. A.; ARBLASTER, J. M.; FASULLO, J. Y.; HU, A.; TRENBERTH, K. E. **Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods.** *Nat. Clim. Change*. 1: 360-4, 2011.

MEEHL, G. A.; TEBALDI, C. **More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21<sup>st</sup> century.** *Science*, 305, 994-997, 2004.

NAIRN, J.; FAWCETT, R. **Defining Heatwaves: Heatwave Defined as a Heat-Impact Event Servicing All Community and Business Sectors in Australia.** Centre for Australian Weather and Climate Research. Melbourne, Australia. p. 84, 2013.

NORTE, F.; SIMONELLI, S. C.; SELUCHI, M.; VIALE, M. **The heat waves in the center of Argentina. Preprints sixth international conference on Southern Hemisphere meteorology and oceanography.** *Am Meteor Soc. Chile*. 198-199, 2000.

OLIVEIRA, F. N. M. **Climatologia de Bloqueios Atmosféricos no Hemisfério Sul: observações, simulações do clima do século XX e cenários futuros de mudanças climáticas.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, F. N. M.; AMBRIZZI, T. **The effects of ENSO-types and SAM on the large-scale southern blockings.** *Int. J. Climatol.*, 2016.

PEDROSO, D.; FERRAZ, S. E. T.; NASCIMENTO, E. L.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. **Influências na alteração do regime de bloqueios atmosféricos sobre o sul do Brasil em um cenário de clima future.** *Ciência e Natura*. 37. P. 83-90, 2015.

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, 2012.

PERKINS, S. E.; WHITE, C. J.; ALEXANDER, L. V.; ARGÜESO, D.; BOSCHAT, G.; COWAN, T.; EVANS, J. P.; EKSTRÖM, M.; OLIVER, E. C. J.; PHATAK, A.; PURICH, A. **Natural hazards in Australia: heatwaves.** *Climatic Change*. 139: 101–114, 2016.

PEZZA A. B.; VAN RENSCH, P.; CAI, W. **Severe heat waves in Southern Australia: synoptic climatology and large scale connections.** *Clim Dyn* 38: 209–224, 2012.

RADINOVIĆ, D.; ĆURIĆ, M. **Criteria for heat and cold wave duration indexes.** *Theoretical and Applied Climatology*. 107, 505-510, 2012.

REX, D. F. **Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. Part I: An aerological study of blocking action.** *Tellus* 2: 196-211, 1950

ROBINSON, P. J. **On the definition of a heat wave.** *J Appl Meteor.* 40: 762-775, 2001.

ROSSO, F. V.; BOIASKI, N. T.; FERRAZ, S. E. T.; DEWES, C. F.; TATSCH, J. D. **Trends and Decadal Variability in Air Temperature over Southern Brazil.** *American Journal of Environmental Engineering*. 5, 85-95, 2015.

RUSTICUCCI, M.; VARGAS, W. **Interannual variability of temperature spells over Argentina.** *Atmosfera*. 14: 75-86, 2001.

RUSTICUCCI, M.; VARGAS, W. **Synoptic situations related to spells of extremes temperatures over Argentina.** *Meteorol. Appl.* 2: 291-300, 1995.

SENEVIRATNE, S. I. **No pause in the increase of hot temperature extremes.** *Nature Clim. Change*, 4161-3, 2014.

SILLMANN, J.; DONAT, M. G.; FYFE, J. C.; ZWIERS, F. W. **Observed and simulated temperature extremes during the recent warming hiatus.** *Environ. Res. Lett.* 9, 064023, 2014.

TRENBERTH, K. E.; AND FASULLO, J. T. **An apparent hiatus in global warming?** *Earth's Future*, 1, 19-32, 2013.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. **Earth's global energy budget.** *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 311-323, 2009.

TRENBERTH, K. E. **Has there been a hiatus?** *Science*, 349, 691, 2015.

VAN LOON, H., **Blocking Action in the Southern Hemisphere, Part I.** *Notos* 5(3):171-175, 1956.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), **Hotter: Heat Waves.** Disponível em: < <https://www.wmo.int/worldmetday/content/hotter>>. Acesso em: 23 de mar. de 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), NASA, NOAA **Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally.** <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally>>. Acesso em: 11 de fev. de 2017.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013).** *International Journal of Climatology*. 4518, 2015.