



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

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO
ATLÂNTICO SUL E IMPACTOS DOS ANOS EXTREMOS SOBRE O CLIMA DA
AMÉRICA DO SUL**

Pedro Fioroti do Amaral

Orientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

Rio de Janeiro, RJ

Abril, 2025

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO
ATLÂNTICO SUL E IMPACTOS DOS ANOS EXTREMOS SOBRE O CLIMA DA
AMÉRICA DO SUL**

Pedro Fioroti do Amaral

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliada por:

Prof.º Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ
(Orientadora)

Prof.º Dr. Wanderson Luiz Silva
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Me. Renan Martins Pizzochero

Rio de Janeiro, RJ
Abril, 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus amigos, sem vocês nada nessa jornada seria possível. Agradeço especialmente a: Catharine Freire, Roberto Baltazar, Tainara Freitas, Raissa Lobo, Jonatha Soares, Malu Rocha, Juan Neres, Kamyllin Pereira, Beatriz Azevedo, Heloisa Santos, Gabriel Machado e Bryan Samuel. Vocês, além de me ajudarem com as próprias coisas da pesquisa e graduação, me ajudaram em algo ainda mais importante: me ajudaram a deixar os momentos difíceis mais leves, passando junto comigo as dificuldades e me ajudando a me tirar do fundo do poço. Sem dúvidas essa fase da minha vida foi bem melhor com a amizade de vocês. Sou imensamente grato por isso.

A minha orientadora Fernanda Vasconcellos e o meu coorientador Renan Martins. Seus ensinamentos sobre a ciência e a vida acadêmica foram essenciais para que eu pudesse chegar ao final com tamanho conhecimento sobre diversos assuntos. Agradeço pela oportunidade que me deram de começar a pesquisa no início da minha graduação, o que me permitiu avançar e progredir com ela junto a minha jornada acadêmica, facilitando meus aprendizados. Sem a ajuda de vocês dois esse caminho teria sido impossível. E desculpa pelos surtos e desespero, é meu jeitinho rs.

Ao meu namorado Lucas Carnielo que esteve comigo nessa reta final e pode me ajudar nas mais diversas esferas de minha vida tanto acadêmica e profissional quanto na pessoal. Você me ajuda a ser uma pessoa melhor todos os dias, te amo muito.

Ao meu eterno filho de quatro patas Nego. A sua presença na minha vida me trazia paz, alegria e amor que não cabiam no peito. Nunca duvidei de que não fui eu quem te salvou, e sim você quem me salvou. Sempre vou lembrar dos momentos durante a pandemia em que eu estava prestes a desistir de tudo, e o simples fato de te fazer um carinho já resolvia tudo e me dava forças para continuar. Sempre te amarei!

Aos professores Wallace Menezes e Fabrício Polifike, que me apresentaram a área da meteorologia com a qual me apaixonei e espero me tornar um ótimo profissional. Seus ensinamentos me fizeram ver como a atmosfera pode ser encantadora e desafiadora.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica associada ao projeto desenvolvido no laboratório GEPAC intitulado “Variabilidade e Tendência Climática do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul”.

Enfim, a todos vocês, o meu mais sincero obrigado!

RESUMO

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão localizado no Oceano Atlântico Sul que apresenta variações de sua intensidade e posição. Nas últimas décadas, devido ao aquecimento global, diversas mudanças têm sido observadas em sistemas meteorológicos, tais como os anticiclones subtropicais. Com isso, este estudo objetiva identificar alterações no comportamento do ASAS, no período de 1980 a 2018, além de buscar quais são os padrões oceânicos e atmosféricos durante os verões e invernos anômalos do ASAS. Para isso, utilizou-se dados da reanálise atmosférica global ERA-Interim e ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). As tendências da posição da borda e centro do ASAS, assim como sua intensidade, foram analisadas com base nos testes de Curvatura de Sen e de Mann-Kendall. Os resultados mostram que o ASAS está, em geral, se expandindo e intensificando em todas as direções e em todas as estações do ano, o que pode resultar em modificações nos regimes de precipitação sobre a América do Sul (AS). Nos seus períodos anômalos máximo, foi identificado um padrão de trem de ondas proveniente do Oceano Pacífico que gerou convergência em altos níveis sobre o ASAS, favorecendo a sua intensificação. Nesses períodos foi observado anomalias negativas (positivas) de precipitação na região da Zona de Convergência do Atlântico Sul (sudeste da AS), além de um posicionamento mais a norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Já para os períodos anômalos mínimos, foram identificados dois trens de ondas, os quais geraram divergência em altos níveis sobre o ASAS, favorecendo sua desintensificação, que favoreceu um posicionamento mais ao sul da ZCIT. Os resultados das estações que precedem os períodos extremos apresentaram bastante semelhanças com os períodos extremos, sugerindo que o ASAS apresenta uma intensificação/desintensificação precedente, atingindo o máximo na estação seguinte. Este estudo evidencia a importância de investigar as transformações nos sistemas meteorológicos, provocadas pelas mudanças climáticas, e suas repercussões no tempo e clima da AS.

ABSTRACT

The South Atlantic Subtropical Anticyclone (ASAS) is a high-pressure system located in the South Atlantic Ocean, known for its variations in intensity and position. In recent decades, global warming has led to several observable changes in meteorological systems, including subtropical anticyclones. This study aims to identify changes in ASAS behavior between 1980 and 2018 and examine the oceanic and atmospheric patterns during ASAS anomalous summers and winters. The research utilized global atmospheric reanalysis datasets from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), specifically ERA-Interim and ERA5. Possible trends in the boundaries, center positions, and intensity of the ASAS were evaluated using the Sen Curve and Mann-Kendall tests. The results indicate that ASAS is, generally, expanding and intensifying in all directions in all seasons, which may result in modifications in precipitation regimes over South America (SA). During periods of maximum anomalous intensity, a wavetrain pattern originating from the Pacific Ocean was identified, which resulted in high-level convergence over the ASAS, leading to its intensification. Negative (positive) precipitation anomalies in the region of the South Atlantic Convergence Zone (SA southeast) in addition to a more northerly positioning of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) were observed throughout the same period. Conversely, during periods of minimum anomalous intensity, we observed two wavetrains, causing high-level divergence over the ASAS and contributing to its weakening, which may have positioned the ITCZ further south. Additionally, the results from the seasons preceding these extreme ASAS periods showed considerable similarity to those during the extreme periods, suggesting that the ASAS experiences a pattern of prior intensification/weakening, reaching its peak in the subsequent season. This study emphasizes the importance of investigating changes in meteorological systems and their potential impacts on weather and climate in SA.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	14
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
2. TENDÊNCIAS SAZONAIS E DECADAIS NO POSICIONAMENTO E MAGNITUDE DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL PARA O PERÍODO DE 1980-2018	17
2.1. INTRODUÇÃO	18
2.2. MATERIAL E METODOLOGIA	21
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.4. CONCLUSÕES	37
2.5. AGRADECIMENTOS	38
3. TENDÊNCIA DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL E IMPACTOS DOS ANOS EXTREMOS SOBRE O CLIMA DA AMÉRICA DO SUL	39
3.1. INTRODUÇÃO	39
3.2. DADOS E METODOLOGIA	43
3.3. RESULTADOS	47
3.3.1. PONTOS EXTREMOS	47
3.3.2. CENTRO	51
3.3.3. PERÍODOS EXTREMOS	55
3.3.4. EXTREMOS MÁXIMOS DE VERÃO E INVERNO	55
3.3.5. EXTREMOS MÍNIMOS DE VERÃO E DE INVERNO	63
3.3.6. CONCLUSÕES	72
3.3.7. MATERIAL SUPLEMENTAR	74
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.3.1. Contornos de anomalia de geopotencial (isolinha de 28 gpm) para representar a extensão espacial do ASAS. Roxo: média de 1980-1989, Verde: média de 1990-1999, Amarelo: média de 2000-2009 e Vermelho: média de 2010-2018. Verão austral (DJF) para ERAI (a) e ERA5 (b), outono austral (MAM) para ERAI (c) e ERA5 (d), inverno austral (JJA) para ERAI (e) e ERA5 (f), primavera austral (SON) para ERAI (g) e ERA5 (h).

Figura 2.3.2. Gráfico de tempo versus latitude do limite norte do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude (°) do limite norte do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 2.3.3. Gráfico de tempo versus latitude do limite sul do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude (°) do limite sul do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 2.3.4. Gráfico de tempo versus longitude do limite oeste do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a longitude (°) do limite oeste do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 2.3.5. Gráfico de tempo versus longitude do limite leste do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a longitude (°) do limite leste do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 2.3.6. Variação da intensidade (em gpm) do centro do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) da intensidade do centro do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 2.3.7. Variação meridional do centro da ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja)

representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude ($^{\circ}$) do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 2.3.8. Variação zonal do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a longitude ($^{\circ}$) do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.1.1. - Gráfico de tempo versus latitude ($^{\circ}$) do limite norte do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.1.2. - Gráfico de tempo versus latitude ($^{\circ}$) do limite sul do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.1.3. - Gráfico de tempo versus longitude ($^{\circ}$) do limite oeste do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.1.4. - Gráfico de tempo versus longitude ($^{\circ}$) do limite leste do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.2.1. Gráfico de tempo versus intensidade (gpm) do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.2.2. Gráfico de tempo versus latitude ($^{\circ}$) do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.2.3. Gráfico de tempo versus longitude ($^{\circ}$) do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Figura 3.3.4.1 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo máximo do ASAS: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN (10^{-6} m.s^{-2} - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente (m.s^{-1} - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). Em todas as imagens, exceto c-d, a isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

Figura 3.3.4.2 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo máximo do ASAS: (a-b) precipitação (mm.dia^{-1}) e (c-d) ROLE (W.m^{-2}). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

Figura 3.3.4.3 - Compostos da anomalia para o período dos verões e invernos austrais extremo máximo do ASAS: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLs (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

Figura 3.3.5.1 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo mínimo do ASAS: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN (10^{-6} m.s^{-2} - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente (m.s^{-1} - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). Em todas as imagens, exceto c-d, a isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

Figura 3.3.5.2 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo mínimo do ASAS: (a-b) precipitação (mm.dia^{-1}) e (c-d) ROLE (W.m^{-2}). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

Figura 3.3.5.3 - Compostos da anomalia para o período dos verões e invernos austrais extremo mínimo do ASAS: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLs (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

S.1 - Fluxograma resumindo a metodologia referente a determinação da abrangência do ASAS.

S.2 - Fluxograma resumindo a metodologia referente a determinação dos períodos extremos do ASAS.

S.3 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo máximo: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN (10^{-6} m.s^{-2} - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente (m.s^{-1} - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os verões extremos máximo, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os invernos extremos máximo. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

S.4 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo máximo: (a-b) precipitação (mm.dia^{-1}) e (c-d) ROLE (W.m^{-2}). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os verões extremos máximo, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os invernos extremos máximo. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

S.5 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo máximo: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLS (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os verões extremos máximo, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os invernos extremos máximo. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

S.6 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo mínimo: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN (10^{-6} m.s^{-2} - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente (m.s^{-1} - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os verões extremos mínimo, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os invernos extremos mínimo. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

S.7 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo mínimo: (a-b) precipitação (mm.dia^{-1}) e (c-d) ROLE (W.m^{-2}). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os verões extremos mínimo, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os invernos extremos mínimo. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

S.8 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo mínimo: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLS (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os verões extremos mínimo, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os invernos extremos mínimo. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.3.1. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo norte do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

Tabela 2.3.2. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo sul do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

Tabela 2.3.3. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo oeste do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

Tabela 2.3.4. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo leste do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

Tabela 2.3.5. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para a intensidade do centro do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em mgp/ano.

Tabela 2.3.6. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para a latitude do centro do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

Tabela 2.3.7. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para a longitude do centro do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

Tabela 3.2.1.: Variáveis utilizadas, com seus respectivos centros, resoluções espacial e temporal.

Tabela 3.3.1.1.: Curvatura de Sen para os pontos extremo norte, sul, oeste e leste do ASAS em cada estação, em graus/década. Os casos que apresentaram significância estatística pelo Teste de Mann-Kendall estão destacados em negrito. Neste estudo foi utilizada confiança de 90%.

Tabela 3.3.2.1.: Curvatura de Sen para a intensidade, latitude e longitude do centro do ASAS em cada estação, em mgp/década (intensidade) e graus/década (latitude e longitude). Os casos que apresentaram significância estatística pelo Teste de Mann-Kendall estão destacados em negrito. Neste estudo foi utilizada confiança de 90%.

Tabela 3.3.3.1.: Quintis extremos para verão e inverno; anos utilizados no cálculo dos compostos.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

AS - América do Sul

BE - balanço de energia

DJF - Dezembro-janeiro-fevereiro

ECMWF - Centre for Medium Range Weather Forecasts

ENOS - El Niño-Oscilação Sul

ERA5 - ECMWF Reanalysis v5

ERA-Interim

ERSSTv5 - *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5*

FCLS - fluxo de calor latente de superfície

FCSS - fluxo de calor sensível a superfície

GPCP - *Global Precipitation Climatology Project*

ICADS - *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset*

IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

JJA - junho-julho-agosto

MAM - março-abril-maio

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NW-SE - noroeste-sudeste

PIBIC/CNPq - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

PNA - Pacífico-América do Norte

PSA - Pacífico-América do Sul

ROLE - Radiação de Onda Longa Emergente

RSLS - radiação solar líquida de superfície

RTLS - radiação térmica líquida de superfície

SAD -Dipolo do Atlântico Sul

SAM - Modo Anular Sul

SON - setembro-outubro-novembro

TN - Takaya e Nakamura

TSM - Temperatura da superfície do mar

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão na região subtropical, caracterizado por circulação anti-horária, com ventos calmos no centro e mais intensos nas bordas, além de subsidência e divergência em baixos níveis (He et al., 2017). O ASAS se localiza entre 15°S - 45°S e 45°W - 15°E, com pouca variação geográfica ao longo do ano (Mächel, Kapala e Flohn, 1988). A manutenção do ASAS está relacionada a fatores como monções (Liu et al., 2004; Rodwell; Hoskins, 2001), diferenças de temperatura da superfície do mar entre o leste e oeste do Oceano Atlântico Sul (Seager et al., 2003) e o ramo de subsidência da célula de Hadley (Mächel, Kapala e Flohn, 1988; Seager et al., 2003). Sua variabilidade sazonal foi amplamente estudada: no verão, apresenta menor intensidade, menor área de abrangência e isóbaras mais circulares (Sun et al., 2017; Reboita et al., 2019); no outono, expande-se para o oeste e aumenta de intensidade; no inverno, atinge sua máxima intensidade e área de abrangência; e, na primavera, começa a se retrair para leste, diminuindo sua intensidade (Reboita et al., 2019).

O ASAS influencia o tempo e clima na América do Sul (AS) ao transportar umidade do Oceano Atlântico Sul, através dos alísios de sudeste, para o continente durante o verão (Reboita et al., 2010), contribuindo para o período úmido e a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS - Carvalho et al., 2004; Silva et al., 2019). No inverno, seu posicionamento favorece movimentos subsidentes, reduzindo a precipitação na região central do continente e enfraquecendo frentes frias (Reboita et al., 2010; Marengo et al., 2020), enquanto os ventos alísios promovem chuvas no litoral leste do Nordeste (Reboita et al., 2016). Os deslocamentos anômalos do ASAS também interferem na intensidade dos ventos sobre a AS. Quando o ASAS está deslocado anormalmente para oeste (leste), há uma intensificação (enfraquecimento) dos ventos no continente, e sua migração anômala para norte no inverno aumenta os ventos na Região Nordeste e reduz na Região Sul do Brasil (Gilliland e Keim, 2018). Além disso, o deslocamento anômalo do ASAS para oeste em seus períodos mais intensos, diminui a frequência e intensidade dos sistemas transientes que passam pela costa leste da AS, diminuindo a precipitação na Região Sudeste do Brasil (GOZZO et al., 2022). O gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico tropical influencia na intensidade do anticiclone: quando positivo, o ASAS se intensifica e desloca a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o norte, reduzindo chuvas no norte do

Nordeste; quando negativo, favorece o deslocamento da ZCIT para o sul, aumentando a precipitação na região (Amorim, Silva e Chaves, 2014; Rodrigues et al., 2011).

Alguns modos de variabilidade, como o Modo Anular Sul (SAM) e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), influenciam o comportamento do ASAS, especialmente no verão austral (Sun et al., 2017). Durante a fase positiva (negativa) do SAM, o ASAS se posiciona em latitudes mais ao sul (norte), o que também desloca a ZCIT para o sul (norte), conforme observado por Carpenedo e Ambrizzi (2020). No caso do ENOS, o ASAS migra para o norte durante eventos de El Niño e para o sul durante La Niña (Sun et al., 2017). Hu et al. (2022) associou a fase quente do ENOS ao aumento da intensidade do ASAS, o que intensifica os ventos de nordeste e, como consequência, eleva o transporte de umidade para o Sudeste da AS. Em contrapartida, durante a fase fria do ENOS, o ASAS tende a enfraquecer, reduzindo os ventos de nordeste e, consequentemente, diminuindo o transporte de umidade para o Sudeste da AS (Reboita et al., 2021). O ASAS também influencia anomalias de TSM no Atlântico Sul (Dipolo do Atlântico Sul - SAD), criando dipolos no sentido sudoeste-nordeste devido a alterações na intensidade dos ventos (Sterl; Hazeleger, 2003; Venegas et al., 1997). Na fase positiva (negativa) do SAD, o ASAS tende a se posicionar mais a norte (sul) (Bombardi et al., 2014).

Diante do contexto de aquecimento global e mudanças climáticas, diversos estudos têm analisado o comportamento do ASAS nas últimas décadas. He et al. (2017) apontaram uma tendência de redução na intensidade do anticiclone, resultado que diverge de outros trabalhos, como os de Reboita et al. (2019) e Gomes e Freitas (2020). De acordo com Reboita et al. (2019), o ASAS apresenta uma tendência de deslocamento para o sul e oeste. Estudos anteriores sugerem um deslocamento do núcleo do ASAS para o sul (Reboita et al., 2019; He et al., 2017; Gomes e Freitas, 2020) e, em outros casos, para o leste durante o inverno (Gomes e Freitas, 2020). A tendência de deslocamento para o sul, tanto do ASAS quanto de seu centro, pode ser atribuída à expansão para latitudes mais altas do ramo de subsidência da Célula de Hadley (Hu et al., 2018; Reboita et al., 2019; Amaral et al., 2024). Zilli et al. (2019) também relatam uma expansão para o sul do ASAS, o que explicaria o deslocamento para sul da ZCAS.

1.1. OBJETIVOS

Visto que não há um consenso entre estudos prévios sobre a resposta o ASAS às mudanças climáticas, e devido a importância do anticiclone para o tempo e clima da América do Sul, este estudo teve como objetivos específicos responder os questionamentos abaixo:

- Há alguma tendência de mudança no anticiclone nas últimas décadas?
- Quais são os padrões oceânicos e atmosféricos durante os períodos extremos do ASAS no verão e inverno?
- Quais são as influências desses períodos extremos no clima da América do Sul?
- Há algum padrão nas estações precedentes aos períodos extremos?

2. TENDÊNCIAS SAZONAIS E DECADAIS NO POSICIONAMENTO E MAGNITUDE DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL PARA O PERÍODO DE 1980-2018

Os resultados desse Capítulo foram submetidos à Revista Brasileira de Geografia Física (RBGF) - Aceito.

RESUMO

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão localizado no Oceano Atlântico Sul que apresenta variações de sua intensidade e posição. Nas últimas décadas, devido ao aquecimento global, diversas mudanças têm sido observadas em sistemas meteorológicos, tais como os anticiclones subtropicais. Com isso, este estudo objetiva identificar alterações no comportamento do ASAS, no período de 1980 a 2018. Para isso, utilizou-se dados de geopotencial em 850 hPa da reanálise atmosférica global ERA-Interim e ERA5 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). As tendências da posição da borda e centro do ASAS, assim como sua intensidade, foram analisadas com base nos testes de Curvatura de Sen e de Mann-Kendall. Os resultados mostram que o ASAS está, em geral, se expandindo e intensificando em todas as direções e em todas as estações do ano. Com isso, é necessário realizar mais estudos de como essas mudanças nos padrões do ASAS podem interferir no tempo e clima da América do Sul, a fim de mitigar as possíveis consequências dessas alterações.

SEASONAL AND DECADAL TRENDS IN THE POSITIONING AND MAGNITUDE OF THE SOUTH ATLANTIC SUBTROPICAL ANTICYCLONE FOR THE PERIOD 1980-2018

ABSTRACT

The South Atlantic Subtropical Anticyclone (SASH) is a high-pressure system in the South Atlantic Ocean that varies in intensity and position. In recent decades, climate change has led to observed changes in meteorological systems, including subtropical anticyclones. This study aims to identify changes in the behavior of the SASH from 1980 to 2018. Geopotential data at 850 hPa by global atmospheric reanalysis ERA-Interim and ERA5 from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) were utilized. Trends in the intensity and position of the edge and center of the SASH were analyzed using the Sen Curve and Mann-Kendall tests. The results indicated that the SASH is generally expanding and intensifying in all directions and seasons of the year. Therefore, further studies are necessary to understand how these changes in the SASH patterns might interfere with the weather and South American climate in order to mitigate potential consequences.

2.1. INTRODUÇÃO

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) faz parte do cinturão de anticiclones presente nas latitudes subtropicais, possuindo como características vento no sentido anti-horário, sendo esse vento calmo no centro e mais intenso nas bordas, além de subsidência e divergência em baixos níveis (He et al., 2017). Os anticiclones subtropicais dependem de algumas condições e mecanismos que permitem a sua atuação durante todo o ano, tais como: gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) entre a parte leste e oeste da bacia oceânica (Seager et al., 2003); sistema de monções (Rodwell e Hoskins, 2001; Liu et al., 2004); ramo subsidente da célula de Hadley (Seager et al., 2003).

Mächel et al. (1988) mostraram que o ASAS fica posicionado entre as latitudes de 5°S a 45°S e longitudes de 45°W a 15°E, apresentando pouca variação ao longo do ano. Outros autores estudaram a variação sazonal do ASAS e identificaram que no verão o anticiclone atinge o mínimo da sua intensidade e a menor área de abrangência, ficando restrito à somente bacia do Oceano Atlântico Sul, sem atingir áreas continentais (Sun et al., 2017; Reboita et al., 2019). No outono o ASAS começa a se intensificar e expandir, e é no inverno que o anticiclone atinge sua intensidade máxima e a maior área de abrangência. Já na primavera, o ASAS começa a enfraquecer e se retrai (Reboita et al., 2019).

O ASAS influencia tanto o tempo quanto o clima na América do Sul. Reboita et al. (2010), Vieira e Cupolilo (2021) e Penna et al. (2021) mostraram que a circulação do anticiclone durante o verão auxilia no transporte de umidade do Oceano Atlântico para a América do Sul, favorecendo a manutenção do período úmido do sistema de monção deste continente. Contudo, durante o inverno, a atuação do ASAS dificulta a formação de chuva sobre a parte central da América do Sul, devido ao posicionamento do setor oeste do anticiclone sobre o continente. O setor leste do nordeste brasileiro é favorecido com os ventos alísios provenientes do ASAS, gerando precipitação na região (Reboita et al., 2016).

Reboita et al. (2022) analisou o Sistema de Monção da América do Sul no clima presente e futuro e identificou que, no clima futuro, o enfraquecimento do ASAS desfavorece o transporte de umidade do Oceano Atlântico Sul para o Sudeste do Brasil. Esse cenário também é observado no clima atual (Gozzo et al., 2021). Córdova et al. (2022) mostraram que a intensidade do ASAS pode estar correlacionado com a intensidade do Sistema de Monção da América do Sul, onde períodos de maior intensidade do ASAS no verão austral estão relacionados a anomalias negativas de precipitação no Nordeste do Brasil e positivas na Amazônia central, Bolívia e o Paraguai.

A variação no posicionamento e intensidade do ASAS ao longo do ano interfere na densidade e posicionamento dos ciclones subtropicais que se formam na costa das Regiões Sudeste e Sul do Brasil (Pérez-Alarcón et al., 2024). Além disso, os ventos de nordeste associados ao ASAS são os principais impulsionadores de umidade para esses ciclones (Pérez-Alarcón et al., 2024). Pérez-Alarcón et al. (2023) também mostrou que o ASAS foi uma importante fonte de umidade para o Furacão Catarina, em 2004.

Variabilidades na posição do ASAS também modificam as condições do tempo na América do Sul. Através de técnicas de correlação entre o ASAS e o vento em baixos níveis (anual e por estações), Gilliland e Keim (2018) mostraram que quando o ASAS está deslocado para latitudes mais baixas (altas), as velocidades do vento no norte e nordeste do Brasil aumentam (diminuem), enquanto um declínio (aumento) na velocidade é observado no sul e sudeste do Brasil. Com relação a longitude, quando o ASAS está deslocado para leste (oeste), há uma diminuição (aumento) dos ventos em todo o Brasil. Gozzo et al. (2022) mostrou que, nos períodos em que o ASAS está mais intenso e deslocado para oeste, diminui a frequência e intensidade dos sistemas transientes que passam pela costa leste da América do Sul, diminuindo a precipitação em áreas da região Sudeste do Brasil.

Diversos modos de variabilidade influenciam o ASAS, tais como o Modo Anular Sul (SAM) e o El Niño Oscilação Sul (ENOS). Sun et al. (2017) observou que, durante a fase

positiva do SAM, o ASAS tende a se deslocar para latitudes mais altas em comparação à sua posição climatológica. Por outro lado, na fase negativa, o ASAS se posiciona em latitudes mais baixas. Esses resultados estão de acordo com os resultados de Carpenedo e Ambrizzi (2020), que demonstraram que, na fase positiva do SAM, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se desloca mais ao sul devido ao posicionamento mais ao sul do ASAS, enquanto o contrário ocorre na fase negativa.

Hu et al. (2022) relacionou a fase quente do ENOS ao aumento da intensidade do ASAS, o que resulta no aumento dos ventos de nordeste e, consequentemente, o transporte de umidade para o Sudeste da América do Sul. Por outro lado, a fase fria do ENOS tende a enfraquecer o ASAS, diminuindo os ventos de nordeste e, consequentemente, o transporte de umidade para o Sudeste da América do Sul (Reboita et al., 2021). Sun et al. (2017) mostrou que em eventos de El Niño o ASAS tende a ter um posicionamento mais a norte que a sua posição climatológica, enquanto o oposto ocorre em eventos de La Niña.

A TSM do Oceano Atlântico Sul também interfere na intensidade do ASAS. Segundo Amorim, Silva e Chaves (2014), quando o gradiente inter-hemisférico no Oceano Atlântico tropical está positivo (TSM do Oceano Atlântico tropical norte maiores que no sul), o ASAS tende a ficar mais intenso, o que por sua vez favorece o posicionamento mais a norte da ZCIT. Nesses casos, é comum ocorrerem déficits de precipitação na faixa norte do Nordeste brasileiro (Rodrigues et al., 2011).

Parise et al. (2022) identificou que a extensão de gelo marinho antártico influencia na intensidade do ASAS, onde períodos com retração anômala acarretam no enfraquecimento do anticiclone. Carpenedo et al. (2022) também analisou a influência do gelo marinho antártico na intensidade do ASAS, mostrando que em eventos de expansão (retração) contribuem para o fortalecimento (enfraquecimento) do ASAS. Fahad et al. (2021) identificou, através de experimentos numéricos, que convecção aprimorada na Zona de Convergência do Pacífico Sul ajuda a disparar trens de ondas de Rossby, que por sua vez, interferem no ASAS, principalmente na parte mais ao sul do anticiclone.

Considerando o cenário de aquecimento global e mudanças climáticas, alguns trabalhos buscam entender como pode ser o futuro do ASAS. He et al. (2017) identificaram uma tendência de enfraquecimento do ASAS, porém esse resultado é oposto ao encontrado em outros trabalhos, como Reboita et al. (2019) e Gomes e Freitas (2020). Reboita et al. (2019), usando o cenário RCP 8.5, mostraram que o ASAS apresenta tendência de deslocamento para sul e oeste. Alguns trabalhos analisaram o deslocamento do centro do ASAS, mostrando que há uma tendência de deslocamento do mesmo para sul (He et al., 2017;

Reboita et al., 2019; Gomes e Freitas, 2020) e para oeste (durante o inverno – Gomes e Freitas, 2020).

Hofmann et al. (2023) mostraram que o ASAS apresentou uma intensificação nas últimas décadas, e essa intensificação acarretou uma diminuição da precipitação no Cerrado brasileiro. Fahad e Burls (2022) buscaram compreender quais mecanismos seriam os responsáveis por gerar mudanças nos anticiclones subtropicais no cenário de aquecimento global. Com relação ao ASAS, os pesquisadores identificaram que a força radiativa direta de CO₂ atua para aumentar a intensidade do anticiclone, enquanto o aquecimento indireto da TSM atua para enfraquecer o ASAS.

Tendo esses trabalhos anteriores em vista, sabe-se que o ASAS é um sistema de suma importância para o tempo e clima na América do Sul, e especialmente o Brasil. As discordâncias entre trabalhos mencionados anteriormente sobre a resposta do ASAS em relação às mudanças climáticas ressalta a importância de mais estudos sobre esse sistema. Este trabalho teve então como objetivo responder aos seguintes questionamentos:

1- Há realmente alguma tendência de mudança do anticiclone, tanto do posicionamento de suas bordas e centro, quanto de sua magnitude?

2 - Como essas supostas tendências se comportam em cada estação do ano?

Considerando as mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global e complexidade da dinâmica atmosférica (IPCC, 2021), a hipótese é que há sim uma tendência no comportamento do ASAS, porém essa tendência pode não ser igual entre as estações do ano e também entre todas as suas características (posição, extensão, intensidade do ASAS).

Nas Seções seguintes serão abordados os produtos usados para a realização desse estudo e a metodologia empregada para a identificação e análise da tendência do ASAS; a apresentação e discussão dos resultados; por fim, as conclusões geradas nesse estudo.

2.2. MATERIAL E METODOLOGIA

Foram utilizadas as saídas mensais das reanálises do ERA-Interim (ERA-Interim) e ERA5 do Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) entre dezembro de 1979 a novembro de 2018, período comum entre as bases de dados. O Era-Interim apresenta uma cobertura espacial global, com resolução horizontal de 0,75° x 0,75° latitude/longitude e 60 níveis verticais da superfície a 1 hPa. O ERA-Interim usa como fonte de dados tanto medições in situ quanto de sensoriamento remoto, apresentando uma ampla fonte de dados. Mais detalhes

sobre o sistema de assimilação de dados do ERA-Interim podem ser encontrados em Dee et al. (2011). O site de onde foram baixados os dados do ERA5 está disponível no seguinte endereço: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>.

O ERA5 é a quinta geração de reanálise atmosférica do ECMWF, substituindo o ERA-Interim, com uma maior resolução espacial e temporal. Os dados cobrem todo o globo com $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de resolução horizontal, ou aproximadamente 30 km, usando 137 níveis da superfície até 1 hPa. O sistema de assimilação de dados também foi renovado, e um grande número de observações históricas (satélite ou in situ) foram assimiladas, apresentando um aprimoramento da Reanálise ERAI. Mais detalhes sobre esta reanálise podem ser encontrados em Hersbach et al. (2020). O site de onde foram baixados os dados do ERA5 está disponível no seguinte endereço: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>.

A variável utilizada de ambas as reanálises foi a altura geopotencial no nível de 850 hPa. A partir das saídas mensais, foram calculadas as médias sazonais da altura geopotencial em 850 hPa. As estações para o cálculo das médias sazonais foram definidas como DJF (dezembro-janeiro-fevereiro, verão austral), MAM (março-abril-maio, outono austral), JJA (junho-julho-agosto, inverno austral), SON (setembro-outubro-novembro, primavera austral).

A metodologia para a detecção do ASAS foi baseada em Sun et al. (2017). Primeiro, a média climatológica sazonal da altura geopotencial em 850 hPa (período de 1980-2010) foi calculada, e então realizada uma média na área compreendida entre 45°S – 0° e 45°W – 10°E (região típica do ASAS). Os resultados foram quatro valores (um para cada estação). Subtraiu-se então dos campos sazonais de geopotencial em 850 hPa na região do Atlântico Sul (70°S a 10°N , e 70°W e 40°E), em cada estação, o valor calculado anteriormente (da estação correspondente), gerando uma anomalia de geopotencial.

Os contornos de anomalia de 28 mgp foram usados para delimitar a posição do ASAS, enquanto seu centro foi identificado como o ponto de grade de anomalia geopotencial mais alta dentro da região do Atlântico. Quando houve mais de um ponto de grade com o valor máximo, a posição central do ASAS foi definida como o ponto médio entre eles. Através da isolinha de 28 mgp, as fronteiras do ASAS foram estabelecidas: fronteira norte (sul) - latitude mais ao norte (sul); fronteira oeste (leste) - longitude mais a oeste (leste).

Gráficos de séries temporais, com linhas de tendência lineares, foram construídos para analisar a tendência do centro e dos limites do ASAS. Além disso, mapas de média decadais (exceto 2010-2018, 9 anos) dos contornos de anomalia de 28 mgp (1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2018) foram criados para visualizar as mudanças do ASAS com o tempo para cada estação.

Testes de significância estatística

A presença e magnitude das tendências nas séries temporais de geopotencial em 850 hPa foram analisadas com base nos testes de tendência de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Wilks, 2011) e de Curvatura de Sen (Sen, 1968; Gocic e Trajkovic, 2013). O teste de Mann-Kendall identifica se há ou não uma tendência significativa, enquanto o teste de Curvatura de Sen estima a inclinação dessa tendência. Ambos são testes não paramétricos e têm sido amplamente utilizados para estudar tendências em variáveis atmosféricas (e.g., Wanderley et al., 2016; Zilli et al., 2016; Bombardi e Carvalho, 2017; Regoto et al., 2018, 2021; Luiz-Silva e Oscar-Júnior, 2022; Luiz-Silva et al., 2023). A estatística S de Mann-Kendal é estimada conforme Equação 1 (Wilks, 2011; Zilli et al., 2016; Regoto et al., 2018, 2021):

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

onde n é o tamanho da série temporal; x é cada uma das medições em diferentes intervalos de tempo i e j , com $i \neq j$, sendo $\text{sgn}()$ definido como:

$$\begin{aligned} \text{sgn} = \{ & 1, \text{ se } (x_j - x_i) > 0 ; \\ & 0, \text{ se } (x_j - x_i) = 0 ; \\ & -1, \text{ se } (x_j - x_i) < 0 \} \end{aligned}$$

(2)

O teste de tendência de Mann-Kendall verifica a hipótese nula de tendência em relação à hipótese alternativa da presença de uma tendência (Jain e Kumar, 2012); s positivo (negativo) indica uma tendência crescente (decrescente), respectivamente.

Se $n > 10$, a estatística s segue uma distribuição gaussiana com média nula ($E[s] = 0$) e variância:

$$\text{Var}[s] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

onde m é o número de grupos empatados (diferença zero entre valores comparados) e t_i é o número de pontos de dados em cada grupo empatado (Wilks, 2011). A significância dessa tendência pode ser encontrada usando escores z , estimados como:

$$z = \left\{ \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, s > 0; \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, s < 0 \right. \quad (4)$$

Se $|z| > z_{\alpha/2}$, a hipótese nula pode ser rejeitada no nível de significância (α) em um teste bilateral (Jain e Kumar, 2012).

O teste do estimador da Curvatura de Sen (eq. 5) considera os declives entre todos os pares de dados na série temporal.

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ para } i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

onde N é o número de pares diferentes de observações de modo que $N = n(n-1)/2$; x_j e x_k são valores de dados no tempo j e k , com $j > k$. O estimador de declive é calculado considerando o valor mediano de todos os $Q_{(i)}$ classificados:

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{\left[\frac{N+1}{2}\right]}, & \text{se } N \text{ é ímpar;} \\ \frac{Q_{\left(\frac{N}{2}\right)} + Q_{\left[\frac{(N+2)}{2}\right]}}{2}, & \text{se } N \text{ é par.} \end{cases} \quad (6)$$

onde Q_{med} representa a inclinação da tendência, com valores positivos (negativos) representando tendências positivas (negativas). O intervalo de confiança para este teste é estimado por $C_\alpha = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}[s]}$, onde $\text{Var}[s]$ é estimado pela Equação (3), e $z_{1-\alpha/2}$ é definido a partir da distribuição normal padrão. O intervalo de confiança é:

$$Q_{min} = Q_{(M_1)} \text{ e } Q_{max} = Q_{(M_2+1)} \quad (7)$$

$$M_1 = \frac{N - C_\alpha}{2} \text{ e } M_2 = \frac{N + C_\alpha}{2} \quad (8)$$

onde Q_{min} e Q_{max} são os limites inferior e superior do intervalo de confiança. A inclinação Q_{med} é estatisticamente diferente de zero se os dois limites (Q_{min} e Q_{max}) tiverem sinal semelhante. Foi utilizada a ferramenta OpenGrads para a manipulação dos dados e para gerar os mapas exibidos nas Figura 2.3.1.. Com os dados da latitude e longitude dos limites do e centro do ASAS, além de sua intensidade, foram gerados os gráficos em Excel. Para a elaboração das tabelas com os resultados da Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, utilizou-se a ferramenta MATLAB.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2.3.1. mostra mapas de contornos de anomalias de 28 gpm para cada estação do ano para ambas as reanálises. Cada linha representa a média de dez anos (exceto a linha vermelha, que é a média de 9 anos, 2010-2018). Os resultados de ambas as reanálises mostram que o ASAS, em geral, se expandiu nas últimas décadas em todas as direções. Essa expansão é mais evidente no setor sul e oeste do anticiclone, onde a diferença entre o início e o final da série é maior. Esses resultados vão de acordo com trabalhos prévios (e.g., Reboita et al., 2019), que mostraram a expansão do ASAS. Essas mudanças da sua área de abrangência podem acarretar mudanças no transporte de umidade do Oceano Atlântico Sul para a América do Sul, modificando o regime de chuvas em diversas regiões.

LIMITES DO ASAS

A análise do limite norte do ASAS exibiu uma tendência de expansão para norte em ambas as reanálises e em todas as estações (Figura 2.3.2.), sendo mais expressivo no inverno (Figura 2.3.2. c). Na Tabela 2.3.1., nota-se que somente o inverno austral (JJA) apresentou tendência, mostrando deslocamento para norte do limite norte do ASAS, com significância em um nível de 10% pelo Teste de Mann-Kendall. Essa tendência de expansão para norte pode influenciar a intensidade dos ventos alísios, o que por sua vez pode influenciar o regime de precipitação na costa leste do Nordeste brasileiro, visto que o período de outono e inverno é a estação chuvosa da região (Reboita et al., 2016).

Para o limite sul, a Figura 2.3.3. mostra que em ambas as reanálises, e em todas as estações, houve a tendência de deslocamento para sul. Na Tabela 2.3.2. também mostra esse comportamento em todas as estações, exceto no verão austral na Reanálise ERA5. Vale ressaltar que a Curvatura de Sen apresentou tendências mais altas para o sul no outono e inverno (maiores para a ERA5). Contudo, apresentou significância no verão e outono (ERA1) e no outono e inverno (ERA5). Essas tendências de expansão para sul podem estar relacionadas à expansão da Célula de Hadley, que tem seu ramo de subsidência deslocado para maiores latitudes (Reboita et al., 2019; Gomes e Freitas, 2020).

Para o limite oeste, todas as estações mostram uma tendência de deslocamento para oeste (Figura 2.3.4.), tornando-se mais próximas da América do Sul. Houve diferenças entre as reanálises com relação às tendências (Tabela 2.3.3.). A estação com maior deslocamento para oeste foi o inverno (outono) para ERAI (ERA5). O outono, inverno e primavera apresentaram uma tendência maior para oeste para o ERA5, em comparação com o ERAI. O ERAI não apresentou tendência no outono. Apenas o inverno austral (ERAI e ERA5) e a primavera (ERA5) exibiram tendências significativas (Tabela 2.3.3.). Essas tendências de expansão para oeste podem acarretar diminuição dos totais pluviométricos em partes da América do Sul, principalmente na fase ativa da monção da América do Sul, como foi o caso do verão de 2014/2015 (Reboita et al., 2015; Coelho et al., 2016). Luiz-Silva e Garcia (2022) identificaram que os acumulados pluviométricos e as vazões de diversas bacias apresentam tendência de diminuição nas últimas décadas na Região Sudeste no verão.

Já o limite leste apresentou tendência de deslocamento para leste em quase todas as estações, com exceção do verão, e em ambas as reanálises (Figura 2.3.5.). Porém, a Tabela 2.3.4. mostra que o verão (ERAI e ERA5) e o inverno (ERAI) austrais não apresentaram tendência pela Curvatura de Sen. Para ERAI e ERA5, a tendência mais alta de deslocamento para o leste ocorreu no outono, com significância em ambas as reanálises para esta estação, e na primavera para o ERAI (Tabela 2.3.4.).

Em geral, embora não haja significância para todos os resultados, esses indicam que o ASAS está se expandindo para todas as direções em todas as estações do ano. Esta expansão é consistente em ambas as reanálises. Esses resultados também estão de acordo com estudos prévios, que mostraram que a ASAS apresenta tendência de expansão para oeste e sul (Reboita et al., 2019; Gomes e Freitas, 2020; IPCC, 2021).

Essa expansão do ASAS pode acarretar modificações no tempo e clima da América do Sul, principalmente a sua expansão para oeste, visto que períodos em que o setor oeste do anticiclone se encontra sobre o continente podem se tornar mais frequentes. Isso resultaria em aumento de secas em áreas como as Regiões Sudeste (Luiz-Silva e Garcia, 2022), Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, o que já vem sendo observado atualmente (Regoto et al., 2021). Essa expansão é preocupante principalmente no período da primavera e do verão, visto que é o período ativo da Monção da AS.

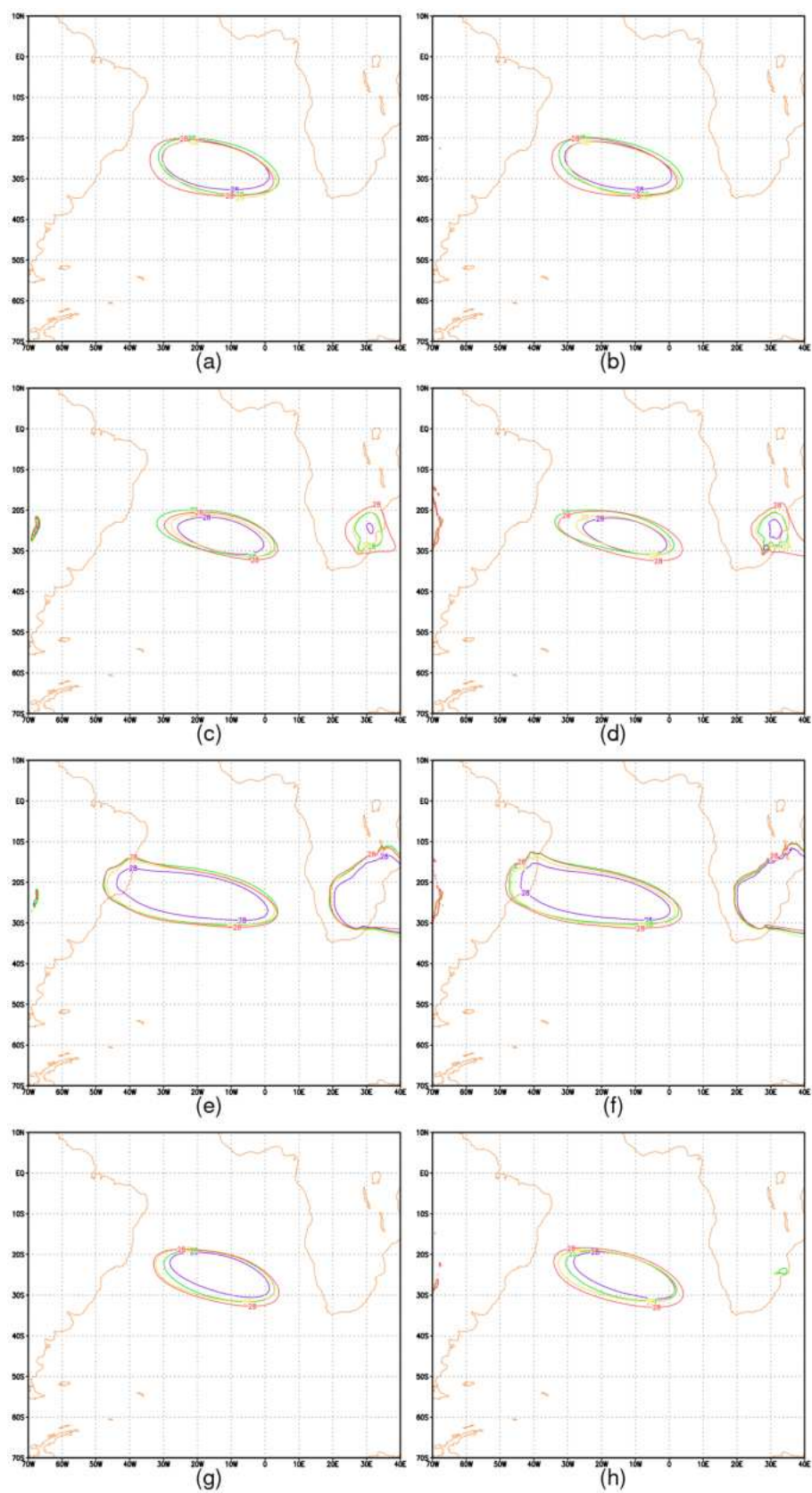


Figura 2.3.1. Contornos de anomalia de geopotencial (isolinha de 28 gpm) para representar a extensão espacial do ASAS. Roxo: média de 1980-1989, Verde: média de 1990-1999, Amarelo:

média de 2000-2009 e Vermelho: média de 2010-2018. Verão austral (DJF) para ERAI (a) e ERA5 (b), outono austral (MAM) para ERAI (c) e ERA5 (d), inverno austral (JJA) para ERAI (e) e ERA5 (f), primavera austral (SON) para ERAI (g) e ERA5 (h).

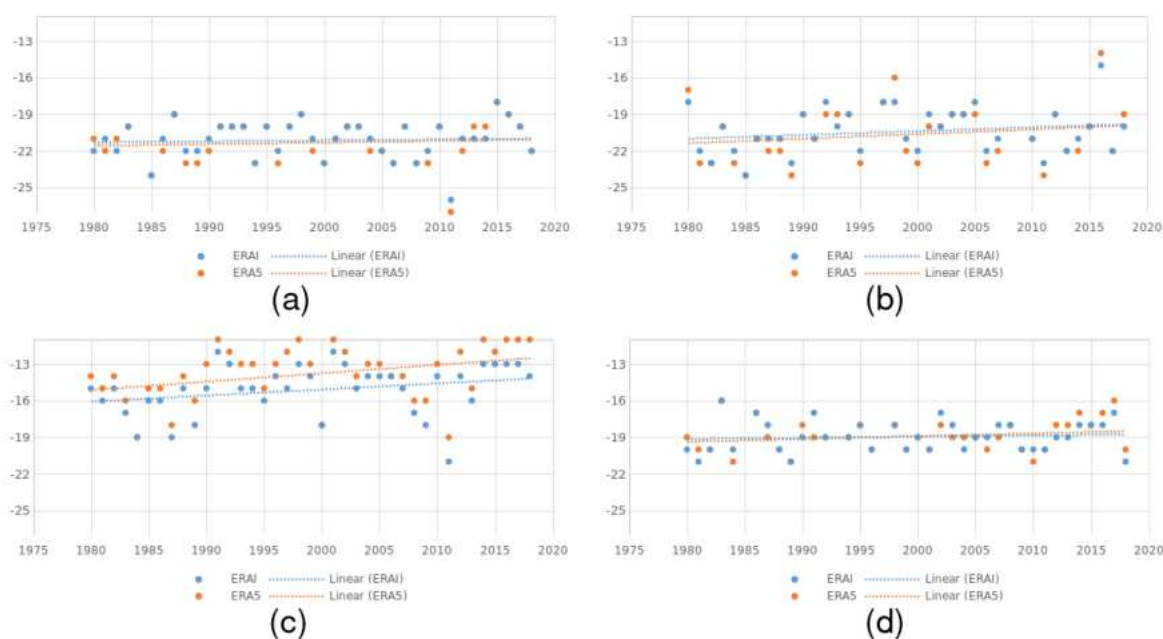


Figura 2.3.2. Gráfico de tempo versus latitude do limite norte do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude (°) do limite norte do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.1. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo norte do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

ERAÍ NORTE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	NÃO	0,000
JJA	SIM	0,077

SON	NÃO	0,000
ERA5 NORTE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	NÃO	0,000
JJA	SIM	0,077
SON	NÃO	0,000

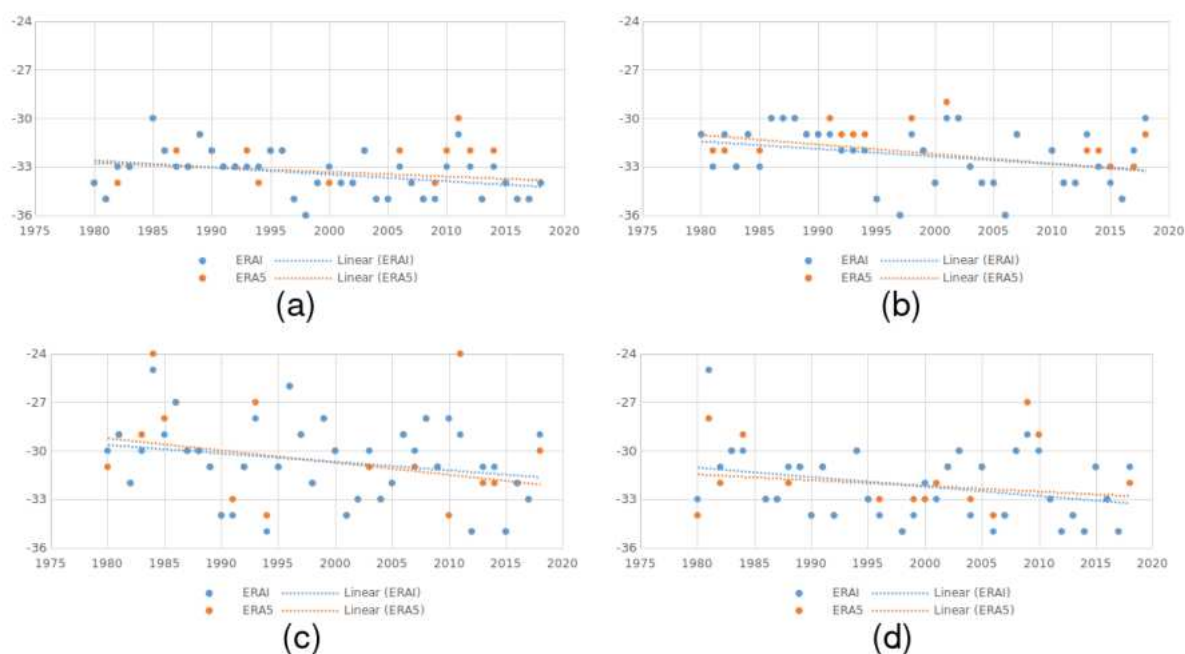


Figura 2.3.3. Gráfico de tempo versus latitude do limite sul do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude (°) do limite sul do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.2. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo sul do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

ERAÍ SUL	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	SIM	-0,037

MAM	SIM	-0,045
JJA	NÃO	-0,045
SON	NÃO	-0,044
ERA5 SUL	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	SIM	-0,056
JJA	SIM	-0,077
SON	NÃO	-0,034

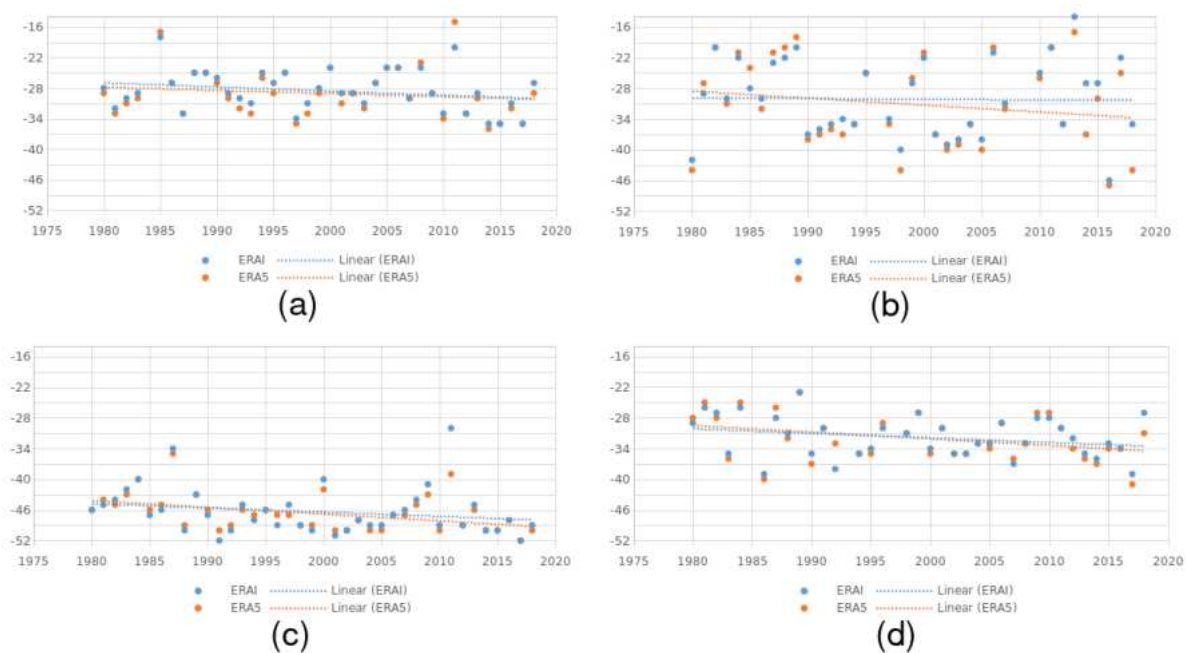


Figura 2.3.4. Gráfico de tempo versus longitude do limite oeste do ASAS para o período de 1980-2018:verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a longitude (°) do limite oeste do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.3. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo oeste do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

ERA1 OESTE	MANN-KENDAL L	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	-0,071
MAM	NÃO	0,000
JJA	SIM	-0,100
SON	NÃO	-0,093
ERA5 OESTE	MANN-KENDAL L	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	-0,062
MAM	NÃO	-0,151
JJA	SIM	-0,133
SON	SIM	-0,143

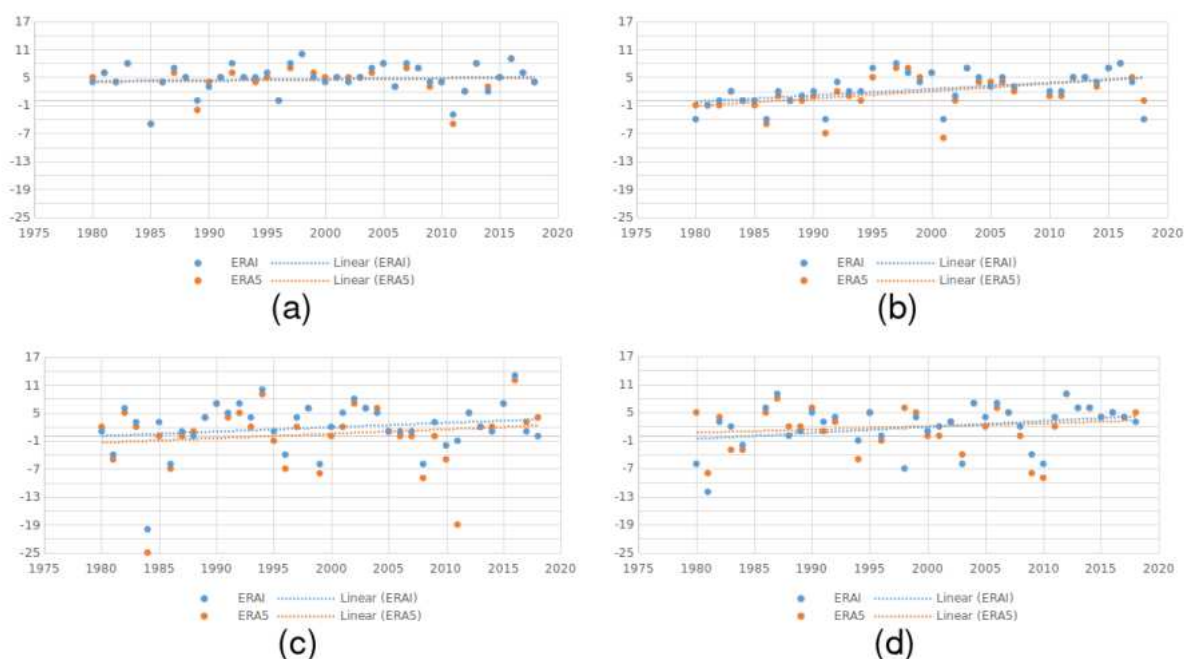


Figura 2.3.5. Gráfico de tempo versus longitude do limite leste do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERA1 (ERA5) para a longitude (°) do limite leste do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.4. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para os pontos extremo leste do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

ERAI LESTE	MANN-KENDAL	CURVATURA DE
	L	SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	SIM	0,170
JJA	NÃO	0,000
SON	SIM	0,113
ERA5 LESTE	MANN-KENDAL	CURVATURA DE
	L	SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	SIM	0,176
JJA	NÃO	0,056
SON	NÃO	0,063

CENTRO DO ASAS

Este estudo também avaliou a tendência do centro do ASAS (posição e magnitude). A análise revelou que o centro do sistema apresenta tendência de aumento de intensidade em todas as estações e em ambas as reanálises (Figura 2.3.6. e Tabela 2.3.5.). Esse resultado concorda com os resultados de Reboita et al. (2019), Gomes e Freitas (2020) e Hofmann et al. (2023). No entanto, apenas para o inverno o ERA5 apresentou uma tendência significativa (Tabela 2.3.5.). Esta estação também apresentou o maior valor da tendência para esta reanálise. Comparando o ERAI e o ERA5, os valores mais altos da tendência ocorreram no ERA5 (Tabela 2.3.5.). Essa tendência de aumento de intensidade, aliada à tendência de deslocamento do ASAS para oeste, pode ser um dos fatores contribuindo para a diminuição dos totais pluviométricos na região central da América do Sul (e.g., Zilli et al., 2016; Regoto et al. 2021, Gozzo et al., 2022).

Além disso, o aumento da intensidade pode estar relacionado a um aumento da subsidência do anticiclone, favorecendo episódios de inversão térmica durante o inverno na Região Sudeste, que por sua vez ajudam a aumentar a concentração de poluentes (Santos et al., 2018). Esse aumento da intensidade do ASAS pode estar associado a intensificação do ramo de subsidência da Célula de Hadley (Vallis et al., 2015), o que seria o responsável por aumentar a subsidência do ASAS e, consequentemente, sua intensidade.

A posição do centro do ASAS também apresentou tendência de mudança ao longo dos anos. Sobre a latitude, todas as estações apresentaram tendência de deslocamento para sul, em ambas as reanálises (Figura 2.3.7.), concordando com He et al. (2017), Reboita et al. (2019) e Gomes e Freitas (2020). Contudo, a Curvatura de Sen mostra que tendência de deslocamento para sul ocorre somente na primavera do ERAI, com significância (Tabela 2.3.6.). Essa tendência de deslocamento para sul do centro do ASAS pode também estar associada ao deslocamento para sul do ramo de subsidência da Célula de Hadley (Reboita et al., 2019; Gomes e Freitas, 2020).

Para a longitude, a Figura 2.3.8. mostra tendência de deslocamento do centro do ASAS para leste no verão, inverno e primavera, e para oeste no outono, em ambas as reanálises. Já o ERAI exibiu um deslocamento para o oeste (leste) no verão (outono) austral (Tabela 2.3.7.). No entanto, nenhum deles foi significativo. O ERA5 exibiu um movimento significativo para o leste no outono. Esses resultados discordam de Gomes e Freitas (2020).

Esses resultados mostram que, de uma forma geral, o ASAS apresenta tendência de aumento de sua intensidade, porém não há uma tendência clara de deslocamento do seu centro. Essa tendência de aumento de intensidade pode acabar potencializando os efeitos da expansão de suas bordas, influenciando mais ainda o tempo e clima na América do Sul.

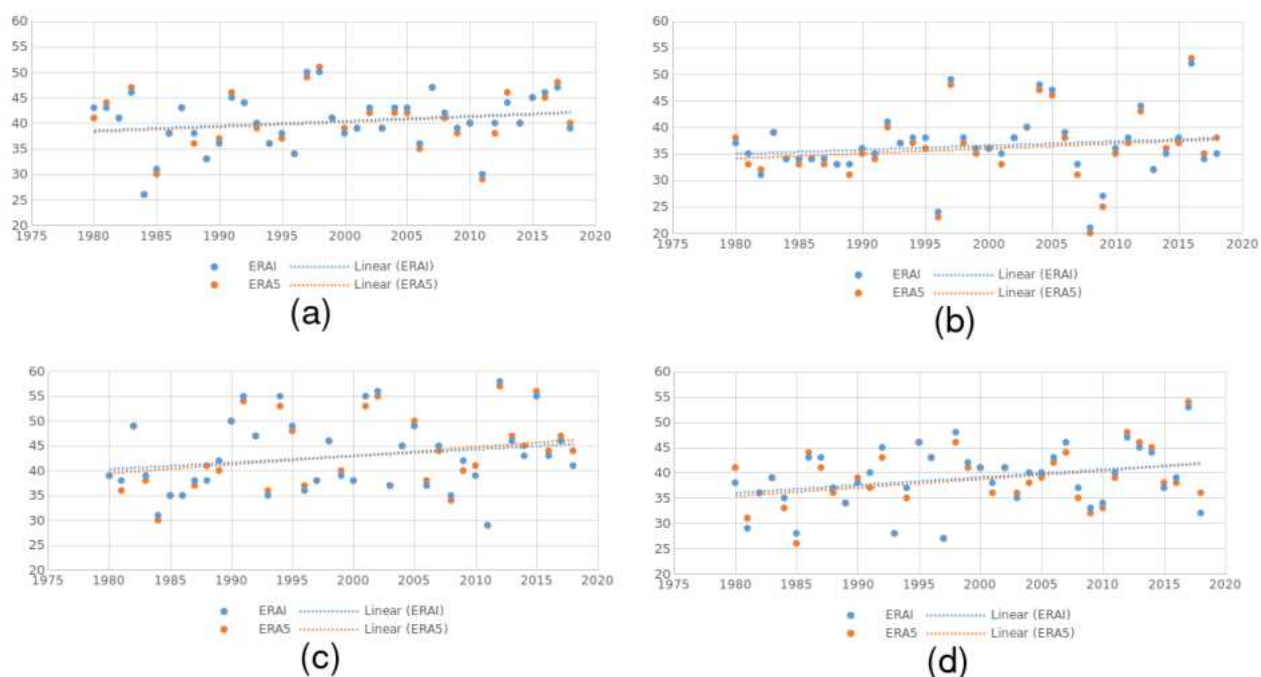


Figura 2.3.6. Variação da intensidade (em gpm) do centro do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) da intensidade do centro do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.5. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para a intensidade do centro do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em mgp/ano.

ERA I INTENSIDADE	MANN-KENDAL L	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,087
MAM	NÃO	0,059
JJA	NÃO	0,129
SON	NÃO	0,143
ERA5 INTENSIDADE	MANN-KENDAL L	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,095
MAM	NÃO	0,100
JJA	SIM	0,207
SON	NÃO	0,143

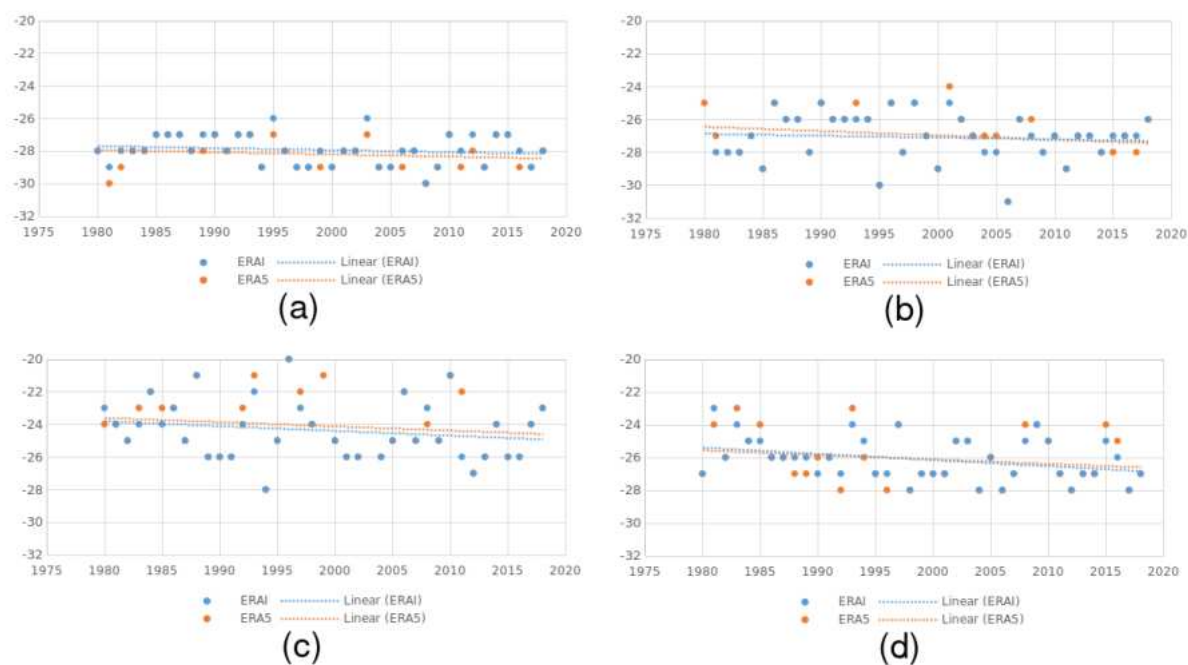


Figura 2.3.7. Variação meridional do centro da ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude (°) do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.6. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para a latitude do centro do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

ERA5 LATITUDE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	NÃO	0,000
JJA	NÃO	0,000
SON	SIM	-0,032
ERA5 LATITUDE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000

MAM	NÃO	0,000
JJA	NÃO	0,000
SON	NÃO	0,000

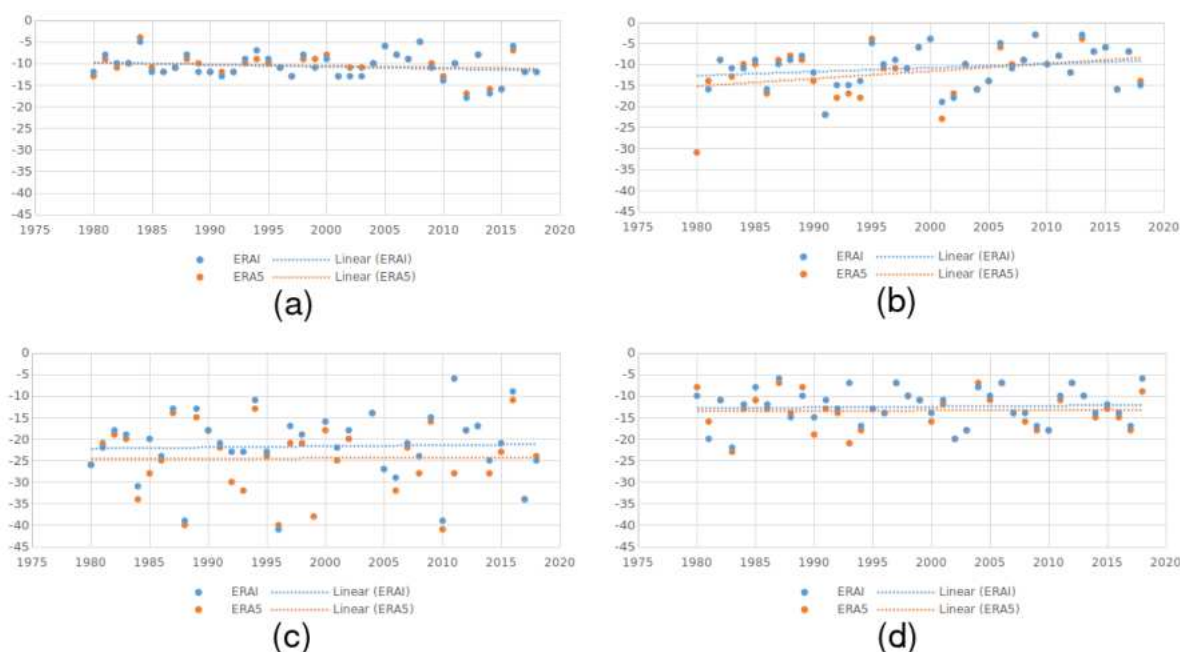


Figura 2.3.8. Variação zonal do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a longitude (°) do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2.3.7. Curvatura de Sen e Teste de Mann-Kendall, com 90% de confiança, para a longitude do centro do ASAS para a base de dados ERAI e ERA5, em graus/ano.

ERAI LONGITUDE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	-0,033
MAM	NÃO	0,100
JJA	NÃO	0,000
SON	NÃO	0,000

ERA5 LONGITUDE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	SIM	0,160
JJA	NÃO	0,000
SON	NÃO	0,000

2.4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi analisado o comportamento sazonal e decadal do ASAS no período de 1980 a 2018. Foi identificado que o ASAS se expandiu nas últimas décadas, principalmente no seu setor oeste e sul. Também foram analisadas separadamente a tendência de cada setor do ASAS (norte, sul, leste e oeste), objetivando identificar se há alguma tendência de mudança no posicionamento das bordas do anticiclone. O setor norte apresentou tendência significativa de deslocamento para norte no inverno em ambas as reanálises. O setor sul apresentou tendência significativa de deslocamento para sul no verão e outono para o ERAI, e no outono e inverno para o ERA5. Já o setor oeste apresentou tendência significativa de deslocamento para oeste no inverno, em ambas as reanálises, e na primavera para o ERA5. O setor leste apresentou tendência significativa de deslocamento para leste no outono de ambas as reanálises e na primavera no ERAI.

Também foi analisado o comportamento do centro do ASAS nas últimas décadas, buscando identificar alguma tendência. Com relação à intensidade, somente o inverno no ERA5 apresentou tendência significativa de aumento de intensidade. Para o posicionamento do centro, o ERAI apresenta tendência significativa de deslocamento para sul na primavera, enquanto o ERA5 mostra tendência significativa de deslocamento para leste no outono.

Portanto, de uma forma geral o ASAS apresenta tendência de expansão, principalmente os setores sul e oeste do anticiclone, e intensificação. Com relação ao deslocamento do centro, as tendências encontradas foram menos expressivas que as das bordas do ASAS. As tendências encontradas sugerem que o ASAS pode acabar interferindo no regime de precipitação em partes da América do Sul, devido à tendência de expansão e de aumento de sua intensidade. Além disso, a intensificação da circulação da Célula de Hadley

causada pela maior convergência na ZCIT e, conseqüentemente, subsidência sobre os anticiclones subtropicais, podem estar favorecendo a tendência encontrada de expansão para sul do ASAS, assim como no aumento da sua intensidade.

Este estudo apresentou um detalhamento maior do comportamento sazonal do ASAS em relação a trabalhos prévios que também estudaram o comportamento do anticiclone, analisando o ASAS através de duas reanálises em todas as estações. Além disso, também foram utilizados testes estatísticos mais sofisticados para obter uma maior robustez nos resultados. Sendo assim este estudo serviu também para ratificar e complementar os resultados desses trabalhos prévios.

Além disso, este estudo trouxe informações relevantes sobre o ASAS, mostrando que houve alterações significativas no anticiclone nas últimas décadas e que elas não ocorrem de forma igual em todas as estações e em todas as características do ASAS (posição, extensão, intensidade). Isso ressalta a importância de mais estudos sobre o ASAS, visto a sua influência no tempo e clima da América do Sul, assim como buscar entender quais mecanismos estão associados aos eventos em que o ASAS está mais ou menos intenso.

2.5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PIBIC/CNPq) e pela FAPEMA/EMAP (Processo APP-09097/22). Gostaríamos de agradecer o apoio à pesquisa e divulgação científica.

3. TENDÊNCIA DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL E IMPACTOS DOS ANOS EXTREMOS SOBRE O CLIMA DA AMÉRICA DO SUL

Os resultados deste Capítulo serão traduzidos para inglês e submetidos à Climate Dynamics.

Resumo

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é caracterizado por um sistema de alta pressão semi-permanente, localizado na bacia do Oceano Atlântico Sul, que apresenta variabilidade tanto no seu posicionamento quanto na sua intensidade. Estudos anteriores mostraram que os anticiclones subtropicais têm sofrido mudanças no seu comportamento devido às mudanças climáticas. Com isso, este estudo objetiva avaliar as mudanças do ASAS entre os anos de 1980 e 2018. Além disso, também foram avaliados como são os padrões oceânicos e atmosféricos antes e durante os verões e invernos extremos do anticiclone. Para isso, foram utilizados dados de diversas variáveis atmosféricas do *European Centre For Medium-range Weather Forecasts* Reanálise v5 (ERA5), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP), e temperatura da superfície do mar do *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature* versão 5 (ERSSTv5). Com relação ao comportamento do ASAS nas últimas décadas, foi identificado, de maneira geral, que o anticiclone se expandiu em todas as direções, além de tendência de intensificação do centro do sistema. Para os períodos extremos do ASAS, foi constatado que a ação conjunta de trens de ondas de origem tropical, com trens de ondas em médias latitudes. Esses trens de ondas influenciam na intensidade do anticiclone, gerando convergência (divergência) em altos níveis nos períodos mais (menos) intensos do anticiclone. Essas variações na intensidade do ASAS interferiram no clima da América do Sul, dependendo da estação e região analisada, gerando anomalias positivas e negativas de precipitação em regiões diferentes. As estações que antecedem os períodos extremos apresentam bastante semelhança com as estações extremas, indicando que os períodos extremos são precedidos por uma intensificação/desintensificação prévia do anticiclone. Os resultados deste estudo mostram a importância de estudos acerca das mudanças ocorridas nos sistemas meteorológicos devido às mudanças climáticas e consequentes interferências no clima da América do Sul.

3.1. INTRODUÇÃO

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) pertence ao grupo dos sistemas de alta pressão de superfície na região subtropical, apresentando como características principais vento no sentido anti-horário, sendo este calmo no centro e mais intenso nas

bordas, além de subsidência e divergência de ar em baixos níveis (He et al., 2017). Mächel et al. (1988) identificaram que os anticiclones subtropicais apresentam pouca variação geográfica ao longo do ano, mostrando que o ASAS se localiza entre 15°S - 45°S e 45°W - 15°E. Alguns mecanismos são necessários para permitir a permanência e manutenção dos anticiclones subtropicais durante todo o ano, tais como: monções (Liu et al., 2004; Rodwell; Hoskins, 2001); gradiente zonal da temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do Oceano Atlântico Sul (Seager et al., 2003) e a presença do ramo de subsidência da célula de Hadley (Mächel et al., 1988; Seager et al., 2003). O ciclo anual do ASAS já foi estudado por diversos trabalhos. Durante o verão, o anticiclone se localiza inteiramente sobre a bacia oceânica do Atlântico Sul, apresentando sua menor intensidade e área de abrangência, além de isóbaras mais circulares. Durante o outono, o ASAS começa a se expandir zonalmente para oeste e a aumentar de intensidade, atingindo o máximo de sua intensidade e área de abrangência durante o inverno. Na primavera, o anticiclone começa a se retrair para leste, diminuindo sua intensidade (Sun et al., 2017; Reboita et al., 2019).

O tempo e clima na América do Sul (AS) são influenciados pela posição e intensidade do ASAS. Segundo Reboita et al. (2010), Vieira e Cupolilo (2021) e Penna et al. (2021) durante o verão, o ASAS auxilia no transporte de umidade do oceano para o continente sul-americano, devido ao seu posicionamento mais a leste do Oceano Atlântico Sul, auxiliando na manutenção do período úmido de Monção da AS através da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS - Carvalho et al., 2004; Silva et al., 2019). Contudo, durante o inverno, a influência do ASAS no continente sul-americano é oposta. Devido ao posicionamento do setor oeste do anticiclone sobre a AS, o qual favorece o movimento subsidente de ar, observa-se uma diminuição dos totais pluviométricos na parte central do continente durante esta estação (Reboita et al., 2010). O ASAS também atua enfraquecendo as frentes frias que passam sobre a região (Marengo et al., 2020). No litoral leste do nordeste brasileiro, durante o outono/inverno, os ventos alísios provenientes do ASAS estão mais intensos e promovem a precipitação na costa (Reboita et al., 2016), caracterizando o período chuvoso da região.

Gilliland e Keim (2018) analisaram como diferentes posicionamentos do ASAS interferem no regime de ventos sobre o Brasil. Eles mostraram que quando o anticiclone está deslocado para oeste (leste), os ventos aumentam (diminuem) sobre o continente, enquanto a migração para norte do ASAS durante o inverno aumenta os ventos na Região Nordeste e

diminuem na Região Sul. A intensidade do ASAS influencia o gradiente inter-hemisférico de TSM no Oceano Atlântico Tropical. Quando o ASAS está mais intenso, esse gradiente tende a ficar positivo (anomalias positivas de TSM no Oceano Atlântico Tropical Norte e negativas no Oceano Atlântico Tropical Sul - Rodrigues et al., 2011), favorecendo o posicionamento mais a norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT - Ferreira e Mello, 2005; Rodrigues et al., 2011). Nesses casos costumam ser observados déficits de precipitação na faixa norte do nordeste brasileiro (Rodrigues et al., 2011). Ao mesmo passo que, quando o ASAS está menos intenso, o gradiente tende a ser negativo (anomalias negativas de TSM no Oceano Atlântico Tropical Norte e positivas no Oceano Atlântico Tropical Sul - Rodrigues et al., 2011), favorecendo o posicionamento da ZCIT mais a sul (Ferreira e Mello, 2005; Rodrigues et al., 2011). Essa configuração costuma favorecer a precipitação na faixa norte do nordeste brasileiro (Rodrigues et al., 2011). Gozzo et al. (2022) demonstraram que, quando o ASAS está mais intenso e deslocado para o oeste, a frequência e a intensidade dos sistemas transientes que passam pela costa leste da América do Sul diminuem, resultando em uma redução da precipitação em áreas da região Sudeste do Brasil.

Alguns modos de variabilidade interferem no comportamento do ASAS. Sun et al. (2017) ao analisarem a influência do Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* – SAM) e do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no posicionamento latitudinal do ASAS durante o verão e inverno austral, identificaram que a maior influência desses modos de variabilidade é durante o verão. Os autores mostraram que a fase positiva (negativa) do SAM, o ASAS tende a se posicionar em latitudes maiores (menores) em relação a sua posição climatológica. Esses resultados são coerentes com os encontrados por Carpenedo e Ambrizzi (2020), que mostraram que durante a fase positiva do SAM se observa o posicionamento mais ao sul da ZCIT, devido ao posicionamento mais a sul do ASAS. O oposto ocorre durante a fase negativa do SAM. Já para o ENOS, Sun et al. (2017) mostraram que o ASAS se posiciona anormalmente mais ao norte durante o El Niño, ocorrendo o inverso durante a La Niña. Hu et al. (2022) associaram a fase quente do ENOS a intensificação do ASAS, aumentando os ventos de nordeste e, conseqüentemente, o transporte de umidade para o Sudeste da América do Sul. Em contrapartida, a fase fria do ENOS tende a desintensificar o ASAS, reduzindo os ventos de nordeste e o transporte de umidade para essa região (Reboita et al., 2022). O ASAS também gera padrões anômalos de TSM no Oceano Atlântico Sul, através de alterações na intensidade dos ventos causadas por mudanças na sua intensidade, levando a um dipolo orientado no sentido sudoeste-nordeste (Sterl; Hazeleger, 2003).

O Pacífico-América do Sul (Pacific-South American - PSA) é outro fator que pode desencadear mudanças no comportamento do ASAS. Mo e Ghil (1987) identificaram que o PSA é composto por um trem de ondas que conecta a região do Oceano Pacífico Sul, próximo à Austrália, com o sul da AS e o Oceano Atlântico Sul adjacente, com alternância de anomalias ciclônicas e anticiclônicas. Estudos relacionaram que eventos de El Niño (La Niña) desencadeiam trens de ondas do tipo PSA que acabam fortalecendo (enfraquecendo) o ASAS (Rodrigues; Campos; Haarsma, 2015).

Parise et al. (2022) ao analisar os impactos de extremos positivos de gelo marinho antártico sobre o clima da AS, mostrou que períodos de retração anômala resultam no enfraquecimento do ASAS. Carpenedo et al. (2022) analisaram como diferentes extensões de gelo marinho antártico no Mar de Weddell influenciam na posição e intensidade do ASAS, identificando que eventos de expansão (retração) contribuem para o fortalecimento (enfraquecimento) do ASAS.

Tendo em vista o cenário de aquecimento global e mudanças climáticas, alguns trabalhos buscaram analisar o comportamento do ASAS nas últimas décadas. He et al. (2017) indicou que o anticiclone apresenta tendência de diminuição da intensidade, o que discorda do encontrado por outros autores, como Reboita et al. (2019) e Gomes e Freitas (2020). Segundo Reboita et al. (2019), o ASAS apresenta tendência de deslocamento para sul e oeste. Trabalhos prévios sugerem um deslocamento do núcleo do ASAS para sul (Reboita et al., 2019; He et al., 2017; Gomes e Freitas, 2020), outros para leste (durante o inverno - Gomes e Freitas 2020). A tendência de deslocamento para sul, tanto do ASAS quanto do seu centro pode ser explicada pela expansão para maiores latitudes do ramo de subsidência da Célula de Hadley (Hu et al., 2018; Reboita et al., 2019, Amaral et al., 2024). Zilli et al. (2019) também mostram uma expansão para sul do ASAS, fato este que explicaria em uma redução (aumento) da intensidade da precipitação durante os meses de primavera/verão austral no lado equatorial (polar) da ZCAS sobre o Brasil. Hofmann et al. (2023) observaram que o ASAS se intensificou nas últimas décadas, resultando em uma redução da precipitação no Cerrado brasileiro. Fahad e Burls (2022) investigaram os mecanismos responsáveis por mudanças nos anticiclones subtropicais no contexto do aquecimento global. Em relação ao ASAS, identificaram que a força radiativa direta do CO₂ contribui para seu fortalecimento, enquanto o aquecimento indireto da TSM tende a enfraquecê-lo

Apesar de diversos estudos indicarem um aumento da intensidade e expansão do ASAS, ainda não há um consenso sobre esses resultados e se essa intensificação é identificada em todas as estações do ano. Também é necessário um melhor entendimento sobre possíveis mecanismos que geram extremos do ASAS e seus impactos no clima da AS. Com isso, este estudo objetiva a elucidação das seguintes questões:

- Houve realmente alguma mudança no padrão do ASAS nas últimas décadas em termos anuais e sazonais?
- Quais os padrões oceânicos (TSM) e atmosféricos durante os períodos extremos do anticiclone durante o verão e inverno?
- Como os períodos extremos do ASAS influenciam o clima da AS?
- Há algum padrão nas estações precedentes aos verões e invernos extremos que possam indicar algum mecanismo precursor?

Os conjuntos de dados utilizados neste estudo são apresentados na Seção 2. A Seção 3 descreve a metodologia empregada na identificação do ASAS, tendências e extremos. A Seção 4 mostra o comportamento do ASAS nas últimas décadas, bem como os mecanismos que desencadeiam os períodos extremos do anticiclone. A Seção 5 traz as conclusões do estudo e as referências são apresentadas na Seção 6.

3.2. DADOS E METODOLOGIA

Os dados e produtos usados neste trabalho estão sumarizados no Quadro 3.2.1.

Quadro 3.2.1.: Informação sobre os dados/produtos usados.

Dado/Produto	Variáveis	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Referência
ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) do European Centre For Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)	• altura geopotencial em 850 e 200 hPa; • componentes zonal e meridional do vento em 850 e 200 hPa; • radiação solar líquida em	0.25°x0.25° lat./lon	mensal	Hersbach et al. (2020)

	superfície (RSLs); • radiação térmica líquida em superfície (RTLS); • fluxo de calor sensível em superfície (FCSS); • fluxo de calor latente em superfície (FCLS).			
Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5) do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	TSM	2.0°x2.0° lat./lon.	mensal	Huang et al. (2017)
NOAA Interpolated Outgoing Longwave Radiation	radiação de onda longa emergente (ROLE)	2.5°x2.5° lat./lon.	mensal	Liebmann; Smith (1996)
Global Precipitation Climatology Project (GPCP)	precipitação	2.5°x2.5° lat./lon.	mensal	Adler et al. (2003)

Para as variáveis do balanço energético (RSLs, RTLS, FCSS e FCLS), o ERA5 assume como positivos valores de fluxos verticais para baixo. O conjunto de dados do ERSSTv5 é baseado no *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset* (ICOADS), fornecidos por satélites de travessia equatorial, enquanto os dados de precipitação são baseados em medições in situ e estimativas de satélites, de órbita baixa (medições passivas de microondas) e geoestacionária (precipitação estimada por infravermelho). Todos os dados utilizados são do período de março de 1979 a novembro de 2018.

As estações para o cálculo das médias sazonais foram definidas como DJF (dezembro-janeiro-fevereiro, verão austral), MAM (março-abril-maio, outono austral), JJA (junho-julho-agosto, inverno austral), SON (setembro-outubro-novembro, primavera austral).

A identificação do ASAS foi baseada na análise da altura geopotencial em 850 hPa, conforme metodologia proposta por Sun et al. (2017). Inicialmente, calculou-se a média climatológica sazonal, de 1980 a 2010, e então realizada uma média na região entre 45°S e o equador e entre 45°W e 10°E (região onde o ASAS está embebido). Os resultados foram quatro valores médios, um para cada estação do ano. O valor obtido dessa média climatológica foi subtraído, para a estação correspondente em cada ano, da região do Atlântico Sul (70°S a 10°N, e 70°W e 40°E). Essa área foi escolhida para ser possível examinar a real abrangência do ASAS em todos os períodos, inclusive os que o anticiclone estivesse mais expandido. Para delimitar a abrangência do ASAS foi escolhida a isolinha de 28 mgp, a partir da qual foram coletados seus pontos extremos para determinar se existe alguma tendência de deslocamento do anticiclone. Foi obtida a latitude do ponto mais a norte (ponto extremo norte) e do ponto mais a sul (ponto extremo sul), e a longitude do ponto mais a oeste (ponto extremo oeste) e do ponto mais a leste (ponto extremo leste), para cada estação durante o período de estudo. Para o centro do sistema, foi obtida a latitude, longitude e intensidade do ponto de grade com maior valor de geopotencial. Nos casos em que houve mais de um ponto de grade com o mesmo valor máximo, foi calculada a média da latitude e longitude desses pontos para identificar a posição do centro do anticiclone.

Para cada uma das séries de dados, aplicou-se o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Sneyers, 1990) com o objetivo de investigar a existência ou não de tendências estatisticamente significativas de aumento ou diminuição na variável em questão. O teste de Mann-Kendall é um dos métodos mais apropriados para analisar a significância de possíveis mudanças climáticas em séries climatológicas e vem sendo aplicado por diversos pesquisadores (e.g., Wanderley et al., 2016; Zilli et al. 2016; Bombardi e Carvalho, 2017; Regoto et al., 2018, 2021; Amaral et al., 2024). A fórmula utilizada para o cálculo do Teste de Mann-Kendall é descrita em Wilks (2011), Zilli et al. (2016), Regoto et al. (2018, 2021) e Amaral et al. (2024). O nível de confiança empregado foi de 90%. A Curvatura de Sen é um método não paramétrico (assumindo uma tendência linear) utilizado para estimar a magnitude das tendências. Como a Curvatura de Sen é insensível a valores fora da curva (outliers) e dados ausentes, tal teste é mais rigoroso que a usual curvatura de regressão e provê uma medida mais realística das tendências numa série temporal (Sen, 1968; Gocic e Trajkovic, 2013).

A Figura S.1, presente no material suplementar (Seção 3.3.7.), mostra um fluxograma resumido referente a metodologia da abrangência do ASAS.

Após a determinação da intensidade do centro do sistema durante o período de estudo, essas intensidades foram ranqueadas para cada estação, a fim de se calcular os quintis extremos máximo (valores acima do percentil 80) e extremo mínimo (valores abaixo do percentil 20). Essa metodologia de seleção de extremos já foi aplicada em diversos estudos (e.g., Penalba & Vargas, 2004; Vasconcellos & Cavalcanti, 2010; Bernardino et al., 2018; Vasconcellos et al., 2023). A análise dos casos extremos teve o foco nas estações de verão (DJF) e inverno (JJA) austrais. O verão foi escolhido por ser o período ativo da monção da AS, enquanto o período do inverno deveu-se ao posicionamento do setor oeste do ASAS sobre a AS (Carvalho et al., 2004; Reboita et al., 2010; Silva et al., 2019). Cada quintil é equivalente a 8 anos, contudo, houve casos em que o último valor do quintil é igual ao último valor imediatamente fora do quintil (verão extremo máximo e inverno extremo mínimo), e nesses casos os anos foram acrescentados no cálculo dos compostos. Uma análise das estações precedentes aos eventos extremos do ASAS também foi abordada para fins de melhor capturar os seus ciclos de vida.

Com o objetivo de identificar possíveis mecanismos físicos associados aos anos de eventos extremos do ASAS ocorridos em cada estação do ano, foram calculados os compostos para as anomalias (em relação à 1980-2010) das seguintes variáveis: TSM, precipitação, ROLE, linha de corrente, velocidade potencial e vento divergente em 200 hPa, função corrente, FCLS, FCSS, RSLs e RTLS. Utilizando a metodologia de Takaya e Nakamura (2001; TN), foram calculados os compostos referentes à divergência do fluxo de TN em 200 hPa, que é uma medida utilizada para identificar fontes e sumidouros de Ondas de Rossby. A divergência positiva (negativa) do Fluxo de TN indica uma região de fonte (sumidouro) de Ondas de Rossby.

A equação que descreve à divergência do fluxo de TN é a seguinte:

$$W = \frac{pcos\Phi}{2|U|} \left\{ \frac{U}{a^2 cos^2\Phi} \left[\left(\frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \right.$$

$$\frac{V}{a^2 \cos^2 \Phi} \left[\frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \Psi'}{\partial \Phi} - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda \partial \Phi} \right] \frac{U}{a^2 \cos^2 \Phi} \left[\frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \Psi'}{\partial \Phi} - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda \partial \Phi} \right] +$$

$$\frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda^2} \right] \} + C_U M,$$

$$C_U M,$$

onde U e V representam a média zonal das componentes zonal e meridional do vento, respectivamente; Ψ' é a componente estacionária da função de fluxo em 200 hPa; λ é a longitude e Φ a latitude; a o raio da Terra; p o nível de pressão analisado (200 hPa); e os termos C_U e M representam, respectivamente, a velocidade de fase na direção zonal e o pseudo-momento para redemoinhos quase geostróficos. Como neste estudo temos o interesse em ondas estacionárias, o valor desse último termo (CUM) deve ser 0.

Nos compostos do balanço de energia (BE), TSM, precipitação e ROLE, foi aplicado o teste T-Students com confiança de 90% (Wilks, 2011). Posteriormente, foi analisado o comportamento das mesmas variáveis atmosféricas e da TSM com uma estação de defasagem, ou seja, nas primaveras e outonos que precederam, respectivamente, os verões e invernos extremos do ASAS. O objetivo dessa parte é tentar identificar possíveis padrões precursores aos verões e invernos extremos.

A Figura S.2, presente no material suplementar (Seção 3.3.7.), mostra um fluxograma resumido referente à metodologia do estudo dos períodos extremos do ASAS.

3.3. RESULTADOS

Nas próximas seções será avaliado o comportamento do ASAS nas últimas décadas, além de buscar identificar possíveis configurações oceânicas e atmosféricas que resultam nos períodos extremos do ASAS.

3.3.1. PONTOS EXTREMOS

Nessa Seção, será analisada a tendência dos pontos extremos do ASAS, além do centro do sistema, objetivando identificar possíveis alterações no posicionamento e intensidade do anticiclone. Analisando a Tabela 3.3.1.1., percebe-se que durante o verão, o ASAS apresentou tendência de expansão para oeste, porém essa tendência não é significativa. Para o outono, o ASAS apresentou tendência de expansão para sul, leste e oeste, com as duas primeiras sendo estatisticamente significativas ($0,6^\circ/\text{década}$ para sul e $1,8^\circ/\text{década}$ para leste). Isso significa que o ASAS apresentou tendência de deslocamento de cerca de 180 km para sul, e 540 km para leste, nas últimas décadas. No inverno, o anticiclone apresentou tendência significativa de expansão em todas as direções ($0,8^\circ/\text{década}$ para norte, $0,8^\circ/\text{década}$ para sul e $1,3^\circ/\text{década}$ para oeste), exceto para leste. Isso mostra que o ASAS apresentou tendência de deslocamento de aproximadamente 240 km para norte e sul, e de 390 km para oeste. Na primavera, o ASAS apresentou tendências de expansão para oeste, leste e sul, embora somente a primeira tenha significância estatística ($1,4^\circ/\text{década}$ para oeste), indicando uma tendência de deslocamento de cerca de 420 km para oeste entre 1980 e 2018. A expansão para oeste do ASAS em todas as estações pode indicar uma redução dos totais pluviométricos sobre parte da AS, principalmente durante a fase ativa da monção da AS, como ocorrido durante o verão de 2014/2015 (Reboita et al., 2015; Coelho et al., 2016). Luiz-Silva e Garcia (2022) mostram que os acumulados pluviométricos e as vazões em diversas bacias da região Sudeste do Brasil diminuíram de maneira significativa ao longo das últimas décadas, especialmente durante o verão. Já a expansão para sul em quase todas as estações pode ser um indicativo da expansão da Célula de Hadley, em resposta às mudanças climáticas, fazendo que seu ramo de subsidência se posicione mais a sul, o que já é evidenciado em outros estudos, como Hu et al. (2018) e Reboita et al. (2019). A tendência de expansão para norte no inverno pode influenciar o regime de precipitação na costa leste do Nordeste brasileiro, principalmente no período chuvoso da região (outono e inverno - Reboita et al., 2016) devido a modificação na intensidade dos ventos alísios na região.

Tabela 3.3.1.1.: Curvatura de Sen para os pontos extremo norte, sul, oeste e leste do ASAS em cada estação, em graus/década. Os casos que apresentaram significância estatística pelo Teste de Mann-Kendall estão destacados em negrito. Neste estudo foi utilizada confiança de 90%.

	Ponto extremo norte	Ponto extremo sul	Ponto extremo oeste	Ponto extremo leste

DJF	0,0°/década	0,0°/década	-0,6°/década	0,0°/década
MAM	0,0 °/década	-0,6°/década	-1,5°/década	1,8°/década
JJA	0,8°/década	-0,8°/década	-1,3°/década	0,6°/década
SON	0,0°/década	-0,3°/década	-1,4°/década	0,6°/década

Na Figura 3.3.1.1., nota-se que em todas as estações houve na tendência de expansão do ramo norte do ASAS para latitudes menores, especialmente no inverno austral, enquanto no ramo sul há a tendência de expansão para maiores latitudes, também mais expressiva no inverno (Figura 3.3.1.2.). Nas Figuras 3.3.1.3. e 3.3.1.4., percebe-se que há a tendência de expansão, respectivamente, para oeste do setor oeste, e leste do setor leste do ASAS, em todas as estações, principalmente no outono.

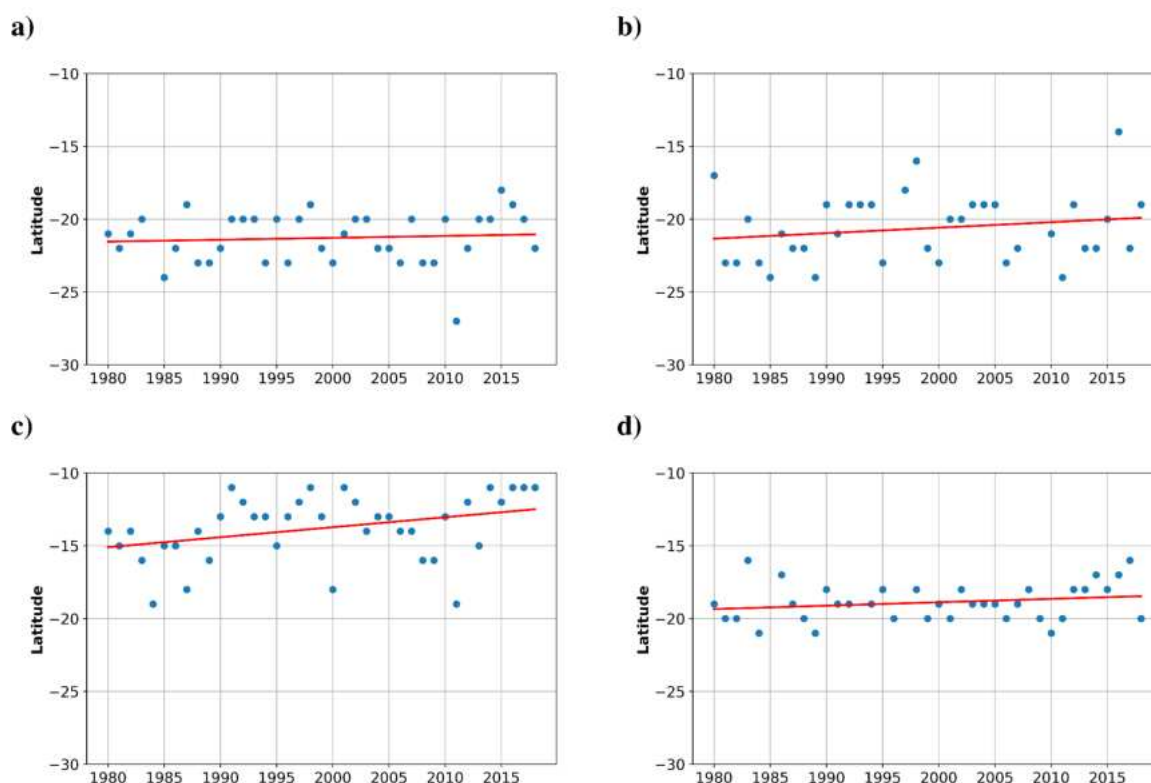


Figura 3.3.1.1. - Gráfico de tempo versus latitude (°) do limite norte do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

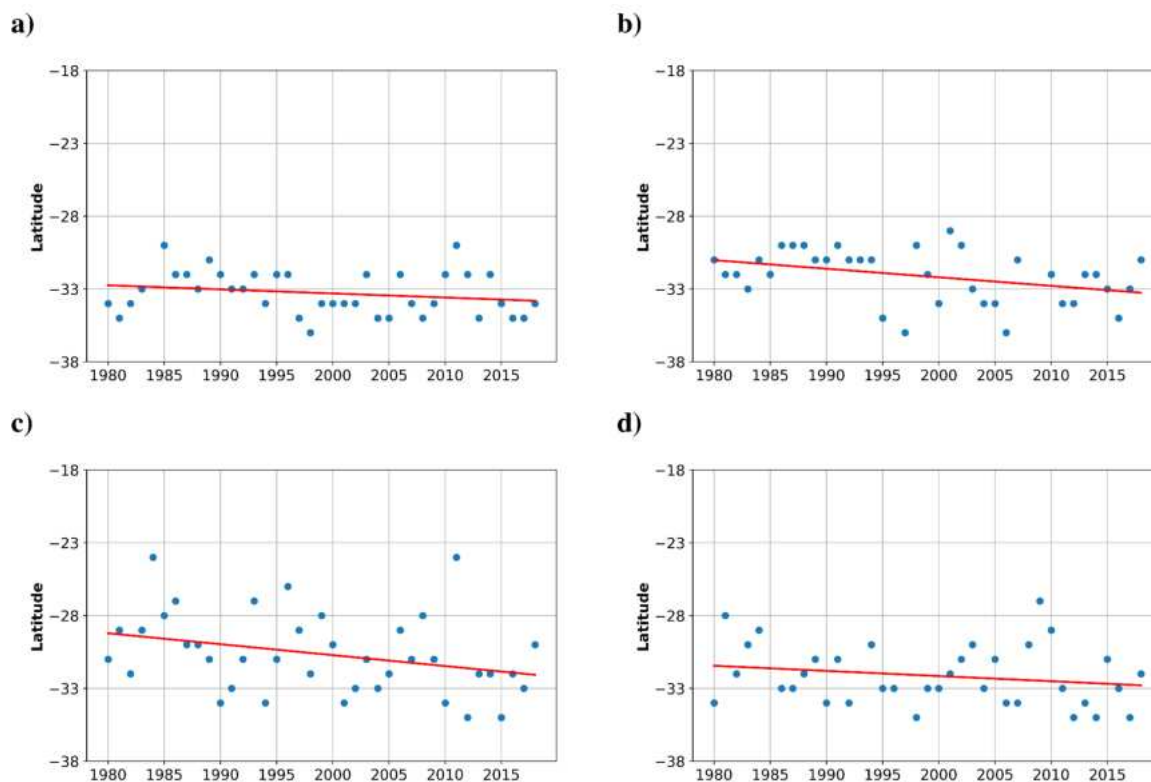


Figura 3.3.1.2. - Gráfico de tempo versus latitude (°) do limite sul do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

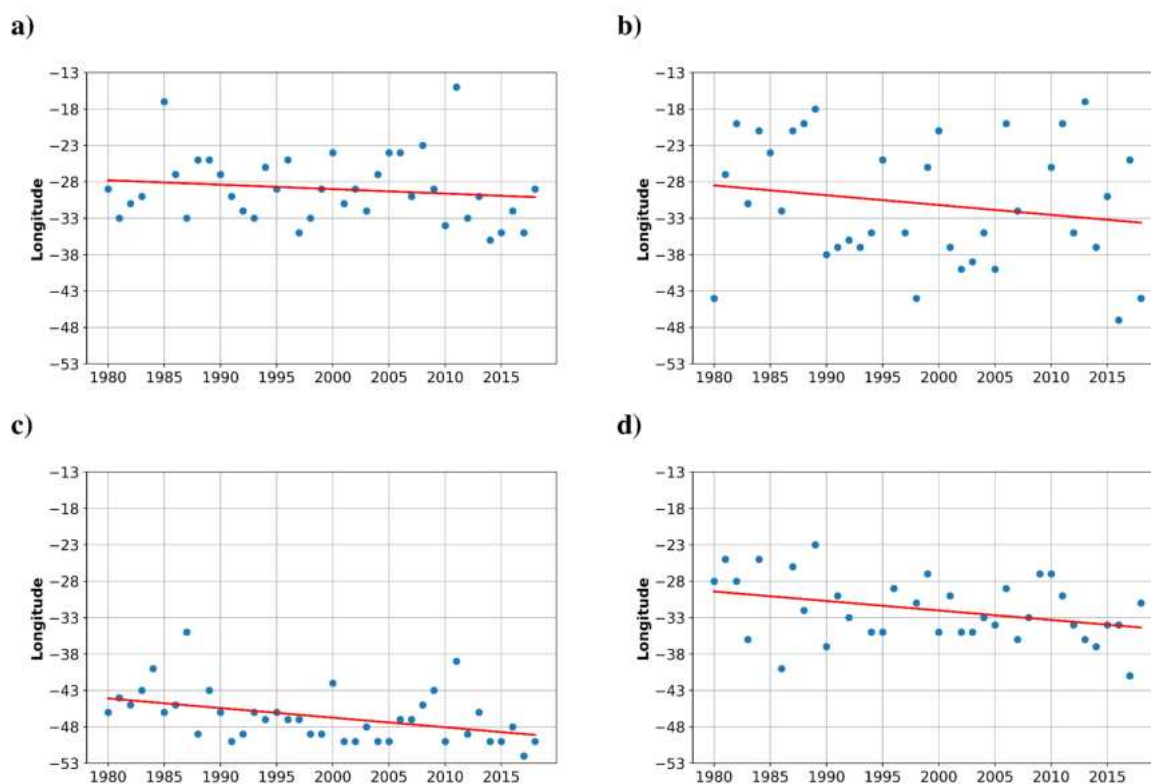


Figura 3.3.1.3. - Gráfico de tempo versus longitude (°) do limite oeste do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

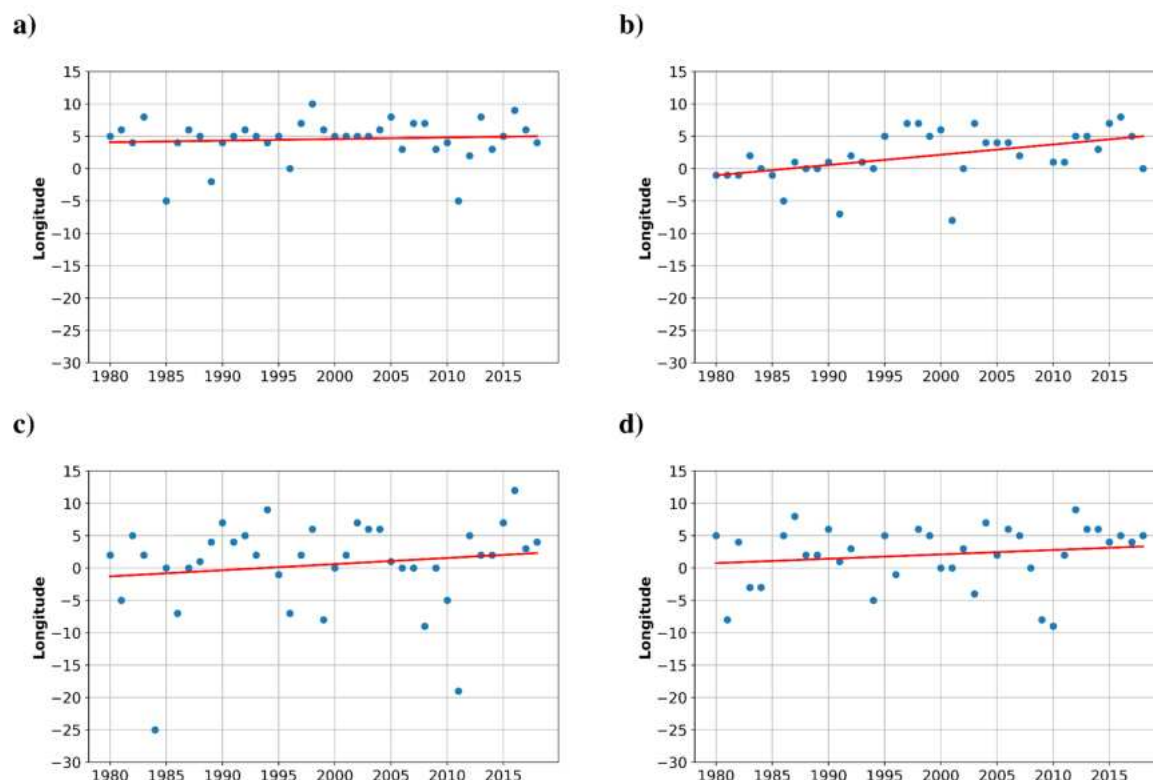


Figura 3.3.1.4. - Gráfico de tempo versus longitude (°) do limite leste do ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

3.3.2. CENTRO

Na Tabela 3.3.2.1., nota-se que a Curvatura de Sen não identificou tendência de deslocamento do centro do ASAS no verão, mas mostrou tendência de aumento da intensidade, porém sem significância estatística pelo Teste de Mann-Kendall. Essa tendência de aumento da intensidade, aliada ao deslocamento para oeste do anticiclone, é outro fator que pode favorecer a diminuição dos totais pluviométricos sobre parte da AS. No outono, a Curvatura de Sen identificou tendência significativa de deslocamento do centro do anticiclone para leste (1,6°/década) e um aumento de sua intensidade, mas sem significância estatística. Isso indica uma tendência de deslocamento de cerca de 480 km para leste. Para o inverno, a Curvatura de Sen mostra tendência de aumento da intensidade do centro do ASAS (2,1

mgp/ano), com significância estatística, mas nenhum deslocamento. Esses resultados se assemelham aos encontrados por Gomes e Freitas (2020), que mostraram aumento na intensidade do anticiclone nas últimas décadas durante o inverno. Na primavera, foi observada tendência de aumento da intensidade do centro do anticiclone, sem significância estatística, e nenhuma tendência de deslocamento.

Tabela 3.3.2.1.: Curvatura de Sen para a intensidade, latitude e longitude do centro do ASAS em cada estação, em mgp/década (intensidade) e graus/década (latitude e longitude). Os casos que apresentaram significância estatística pelo Teste de Mann-Kendall estão destacados em negrito. Neste estudo foi utilizada confiança de 90%.

	Intensidade	Latitude	Longitude
DJF	1,0 mgp/década	0,0°/década	0,0°/década
MAM	1,0 mgp/década	0,0°/década	1,6°/década
JJA	2,1 mgp/década	0,0°/década	0,0°/década
SON	1,4 mgp/década	0,0°/década	0,0°/década

Com relação ao centro do ASAS, há tendência de aumento de intensidade em todas as estações (Figura 3.3.2.1.), especialmente no outono. Com relação ao posicionamento do centro do ASAS, há tendência de deslocamento para sul em todas as estações, especialmente no outono (Figura 3.3.2.2.), e tendência de deslocamento para oeste no verão e leste no outono (Figura 3.3.2.3.).

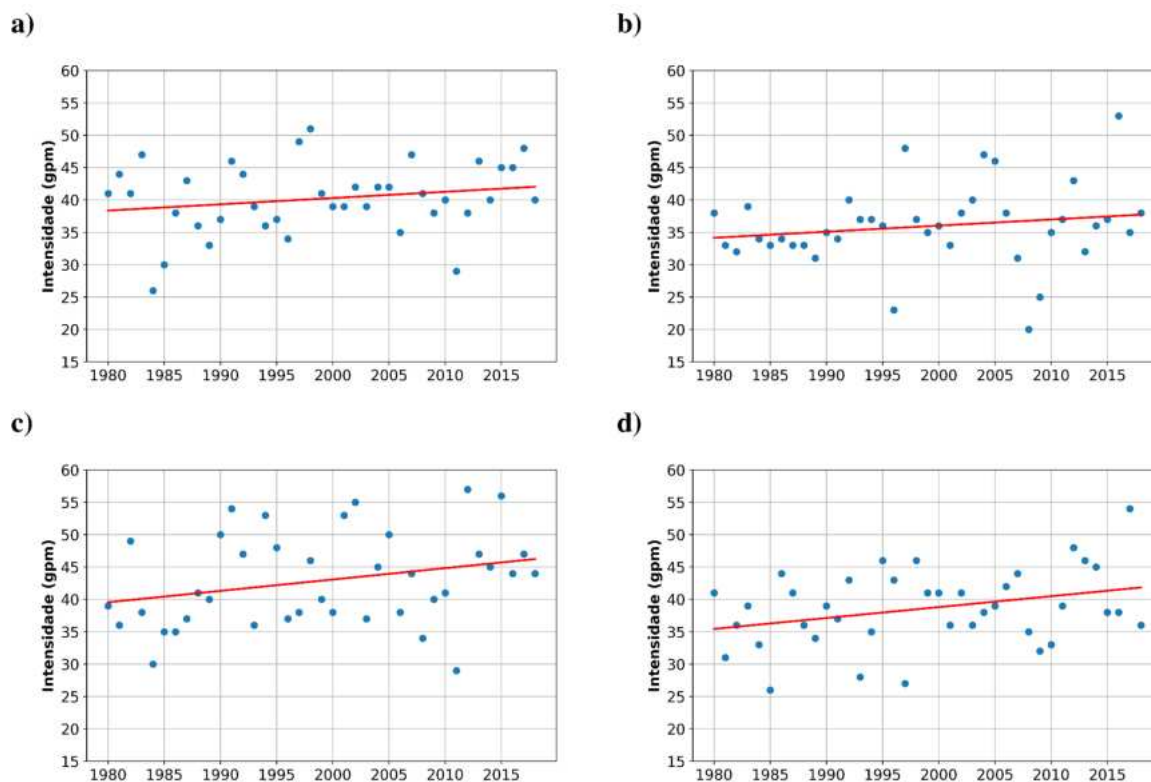


Figura 3.3.2.1. Gráfico de tempo versus intensidade (mgp) do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

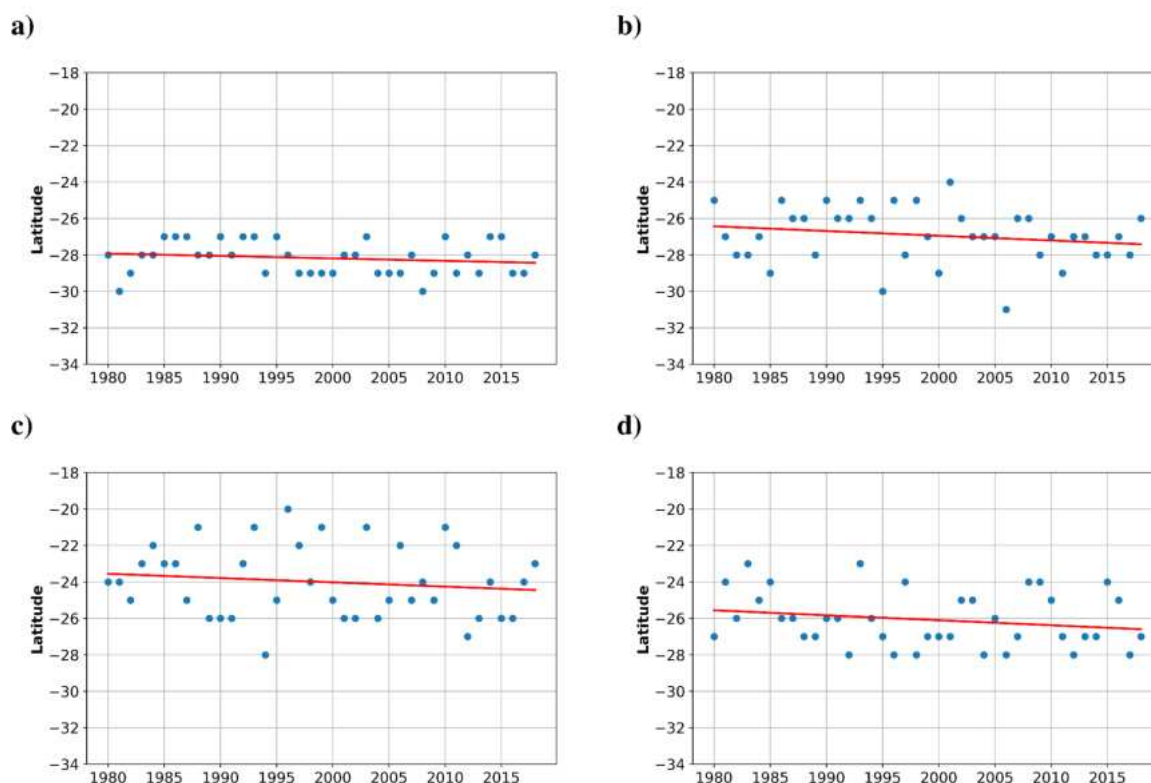


Figura 3.3.2.2. Gráfico de tempo versus latitude ($^{\circ}$) do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

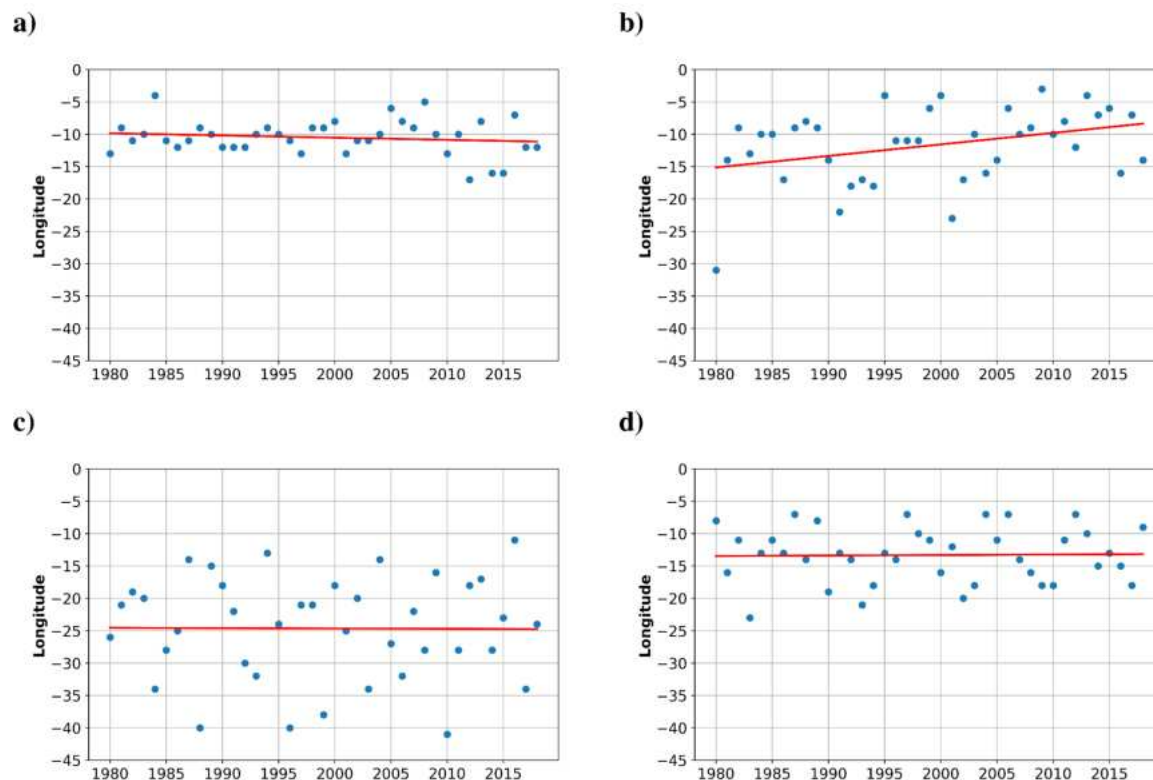


Figura 3.3.2.3. Gráfico de tempo versus longitude ($^{\circ}$) do centro ASAS para o período de 1980-2018: verão austral (a), outono austral (b), inverno austral (c), primavera austral (d). As linhas mostram tendências lineares.

Esses resultados mostram como o comportamento do ASAS tem mudado nas últimas décadas, especialmente seu setor oeste e a intensidade do seu centro. Essas mudanças são especialmente preocupantes no verão, devido ao período ativo da monção da AS, e no inverno, devido ao posicionamento do setor oeste do anticiclone sobre a AS. Mudanças no comportamento do ASAS nessas estações podem acarretar mudanças significativas no clima da AS. Por isso, os estudos dos extremos nas seções seguintes terão foco nos períodos do verão e inverno, buscando entender os mecanismos físicos precursores que geram os períodos extremos do ASAS.

3.3.3. PERÍODOS EXTREMOS

Nota-se que na Tabela 3.3.3.1. a maioria dos anos considerados extremos máximos ocorrem após o ano 2000, enquanto os extremos mínimos são mais frequentes nos primeiros 20 anos da série. Isso sugere que as mudanças climáticas observadas nas últimas décadas (IPCC, 2021) podem ser responsáveis por uma maior frequência de extremos máximos do ASAS. Esses resultados são corroborados pela tendência de aumento da intensidade do ASAS, como discutido anteriormente (vide Seção CENTRO). Essa discussão mostra a importância de se avaliar os possíveis mecanismos físicos que geram os períodos extremos do anticiclone, a fim de compreendê-los e talvez encontrar precursores, visto os impactos que o ASAS tem sobre o clima da AS.

Tabela 3.3.3.1.: Quintis extremos para verão e inverno; anos utilizados no cálculo dos compostos.

ESTAÇÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
DJF	1998, 1997, 2017, 2007, 1983, 2013, 1991, 2016, 2015	1994, 1988, 2006, 1996, 1989, 1985, 2011, 1984
JJA	2012, 2015, 2002, 1991, 2001, 1994, 2005, 1990	2003, 1996, 1987, 1993, 1981, 1986, 1985, 2008, 1984, 2011

3.3.4. EXTREMOS MÁXIMOS DE VERÃO E INVERNO

As Figuras 3.3.4.1 a-d mostram a presença de dois trens de ondas, um de médias latitudes e outro de origem tropical. O trem de ondas de origem tropical se origina sobre o Oceano Pacífico Equatorial, começando com anomalia anticiclônica, se propagando até o Oceano Atlântico Sul em ambas as estações para os compostos extremos máximos do ASAS. Esses trens de ondas fazem a região do ASAS ficar na divisão entre duas anomalias: ciclônica ao norte e anticiclônica ao sul. Coelho et al. (2016) também identificaram um padrão similar de par de anomalias ciclônicas e anticiclônicas entre a AS e o Oceano Atlântico (modo de

bloqueio), no verão de 2014, sugerindo que tal configuração favorece a intensificação do ASAS. No campo de anomalias da velocidade potencial e vento divergente (Figura 3.3.4.1 e-f), nota-se a presença de convergência anômala em altos níveis sobre a região do ASAS. Essa convergência anômala sugere o fortalecimento da subsidência e consequente intensificação do anticiclone, sendo coerente com a anomalia anticiclônica observada em 850 hPa na região do ASAS (Figura 3.3.4.1 g-h) e com as observações feitas anteriormente.

Os trens de ondas provenientes do Oceano Pacífico Equatorial têm origem sobre uma região de anomalia positiva de TSM (Figura 3.3.4.1 i-j), característicos de episódios de El Niño (Philander, 1989; Trenberth, 1997; Grimm, 2003). Isso indica que sua origem está relacionada à convecção anômala nessa região, o que é confirmado pela área de divergência anômala observada em 200 hPa (Figura 3.3.4.1 e-f), e pela anomalia positiva de precipitação e negativa de ROLE (Figura 3.3.4.2 a-d). Essa anomalia observada na divergência em 200 hPa dispara trens de ondas, o que é confirmado através da divergência do Fluxo TN (Figura 3.3.4.1 c-d), o qual mostra que a região é fonte de geração de ondas de Rossby (valores positivos próximos à 150°W).

No Oceano Atlântico Sul, nota-se que existe um tripolo nos extremos máximos de inverno, o que não é observado nos extremos máximos de verão (Figura 3.3.4.1 i-j). A alternância entre anomalias positivas e negativas de TSM na região tropical e subtropical na região do tripolo pode ter relação com um fortalecimento do ramo de subsidência da Célula de Hadley, intensificando o anticiclone durante os extremos máximos de inverno (Gomes; Freitas, 2020). Tanto o verão quanto o inverno mostraram anomalias de TSM positivas na região subtropical e negativas na extratropical, formando um dipolo positivo. No caso do inverno, este sendo parte do tripolo citado acima. Trabalhos anteriores associaram o dipolo positivo de TSM entre no Oceano Atlântico Subtropical e Extratropical (Figura 3.3.4.1 i), e um conjunto de trens de ondas advindo do Oceano Pacífico, com secas na Região Sudeste do Brasil, ambos durante os extremos máximos de verão (e.g. Bernardino et al., 2018; Vasconcellos; Souza, 2022; Vasconcellos et al., 2023). Esses resultados são coerentes com as anomalias negativas de precipitação e positivas de ROLE observadas na Região Sudeste do Brasil (Figura 3.3.4.2 a e c).

VERÕES EXTREMOS INVERNOS EXTREMOS

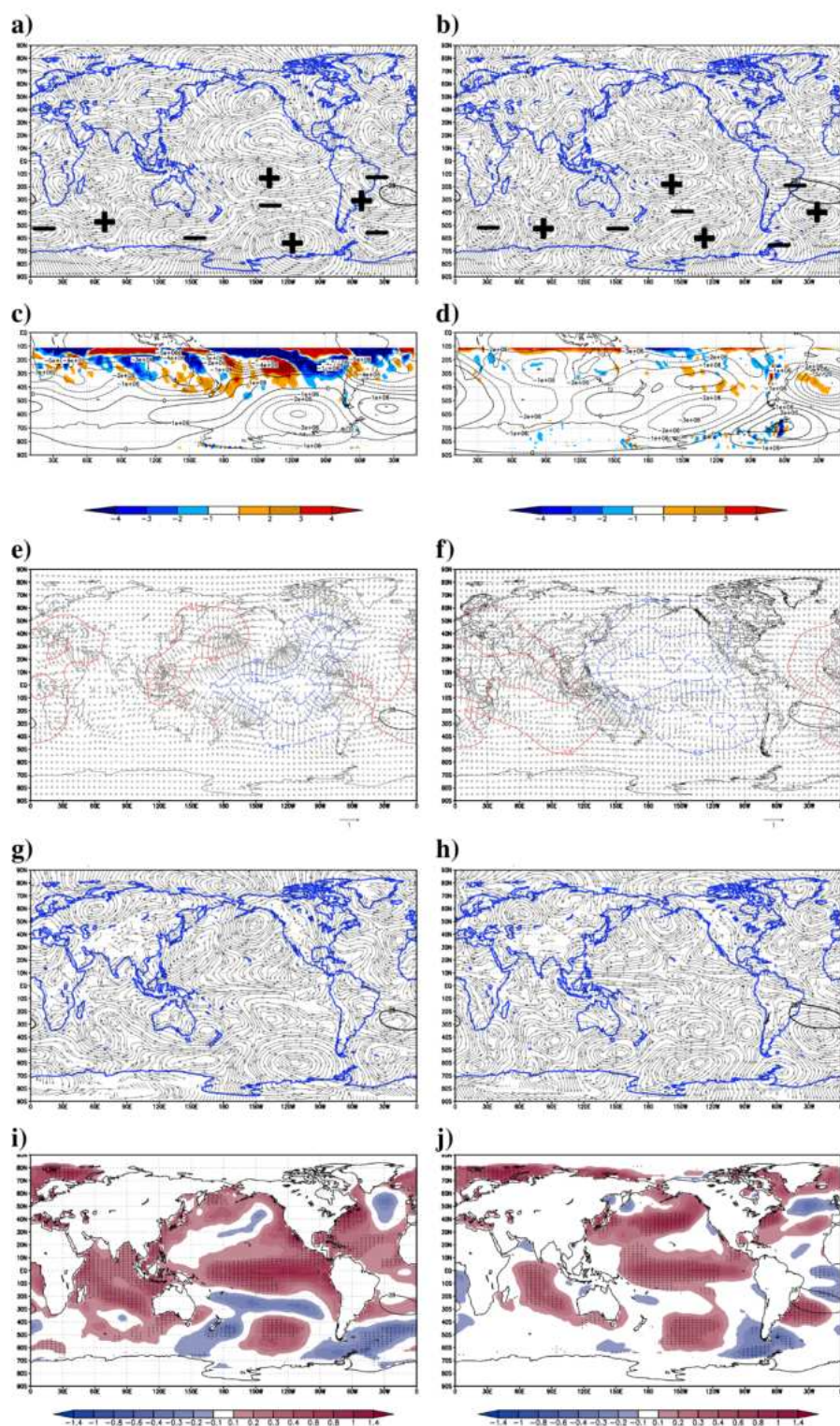


Figura 3.3.4.1 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo máximo do ASAS: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN ($10^{-6} \text{ m}.\text{s}^{-2}$ - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente ($\text{m}.\text{s}^{-1}$ - vetor) em 200 hPa, (g-h)

linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM (°C). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). Em todas as imagens, exceto c-d, a isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

No litoral norte da AS, além do Oceano Atlântico Equatorial, também se observa a presença de anomalias negativas de precipitação e positivas de ROLE (Figura 3.3.4.2 a-d). Essas anomalias indicam um possível posicionamento mais a norte da ZCIT, tanto nos extremos máximos de verão como de inverno. Essas anomalias são coerentes com períodos mais intensos do ASAS, visto que os alísios de sudeste ficam mais intensos, favorecendo um posicionamento mais a norte da ZCIT (Ferreira e Mello, 2005). Outro fator que ajuda a explicar essas anomalias nos campos de precipitação e ROLE é a convergência anômala em 200 hPa sobre e norte e nordeste brasileiro nos extremos máximos de verão, e sobre o Oceano Atlântico Equatorial durante os extremos máximos de inverno (Figura 3.3.4.1 e-f), dificultando a convecção sobre essa região. Além disso, há um gradiente meridional positivo de TSM no Oceano Atlântico Tropical (Figura 3.3.4.1 i-j), que favorece o posicionamento mais a norte da ZCIT (Ferreira e Mello, 2005; Rodrigues et al., 2011). Por outro lado, entre o sudeste da AS e o Oceano Atlântico Sul adjacente, observa-se a presença de anomalias negativas de ROLE e positivas de precipitação em ambas as estações, sugerindo o aprisionamento dos sistemas transientes entre o sul e sudoeste do ASAS nos seus extremos máximos (Gomes; Freitas, 2020). Sobre a AS durante os extremos máximos de verões, nota-se que há uma faixa, orientada no sentido NW-SE (típica da atuação da ZCAS), que apresenta anomalias negativas de precipitação (Figura 3.3.4.2 a), o que é coerente com a anomalia positiva de ROLE (Figura 3.3.4.2 c), que indica menos nebulosidade nesta região. Esse padrão de “gangorra” de precipitação entre o centro da AS e o sudeste da AS já foi analisado em estudos anteriores (Nogués-Paegle e Mo 1997; Díaz e Aceituno 2003; Liebmann et al. 2004; Gonzalez e Vera 2014; Mattingly e Mote 2017). Durante os extremos máximos de inverno, percebe-se a presença de anomalia positiva de precipitação em parte na costa leste do Nordeste do Brasil (Figura 3.3.4.2 b), sendo coerente com períodos mais intensos do ASAS, devido à maior confluência dos alísios com a brisa terrestre (Kousky, 1980).

VERÕES EXTREMOS INVERNOS EXTREMOS

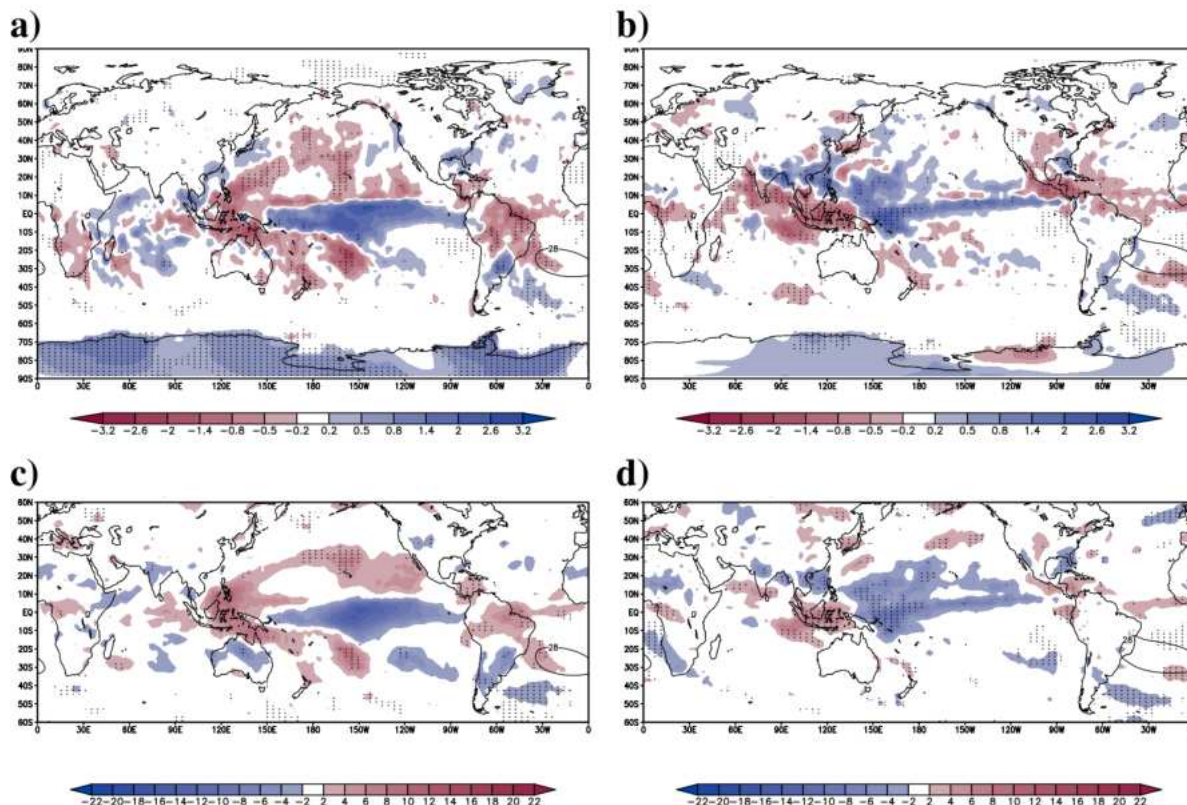


Figura 3.3.4.2 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo máximo do ASAS: (a-b) precipitação (mm.dia^{-1}) e (c-d) ROLE (W.m^{-2}). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. A isolinha (28 mgp) é referente à abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

O campo de FCLS (Figura 3.3.4.3 a) mostra que a norte, leste, oeste e centro do ASAS houve maiores taxas de liberação de calor latente para a atmosfera (anomalia negativa) durante os extremos máximos de verão. Nos extremos máximos de inverno (Figura 3.3.4.3 b), ocorrem maiores liberações de calor latente entre o centro, leste e noroeste do ASAS. Essas anomalias indicam que na região há mais evaporação, o que é condizente com os períodos mais intensos do anticiclone, onde se espera o aumento da subsidência e intensificação dos alísios de sudeste (Carpenedo; Ambrizzi, 2020), aumentando a taxa de evaporação (Seager et al., 2003). Sobre o Oceano Atlântico Sul, nota-se no campo de RSLs (Figura 3.3.4.3 c-d) que nas regiões que apresentam anomalias positivas (negativas) de TSM (Figura 3.3.4.1 i-j) em geral também apresentam anomalias positivas (negativas) de RSLs. Isso mostra que as

alterações na TSM estão relacionadas a modificações na incidência de radiação solar na superfície. Durante os extremos máximos de verão, nota-se sobre a AS anomalias positivas de RSLS e negativas de RTLS (Figura 3.3.4.3 c-e) na região de atuação da ZCAS e nordeste do Brasil. Essas anomalias indicam, respectivamente, mais radiação solar chegando à superfície e mais radiação térmica sendo emitida pela superfície, coerentes com as anomalias de ROLE e precipitação (Figura 3.3.4.2 a-c) mencionadas anteriormente.

Já para a região a sudoeste (extremos máximos de verão) e sul (extremos máximos de inverno) do ASAS, os campos de RTLS e FCSS (Figura 3.3.4.3 e-h) mostram que houve, respectivamente, menos radiação térmica sendo emitida pela superfície e menos fluxo de calor sensível para a atmosfera (anomalias positivas em ambos). Essas anomalias indicam que a superfície estava menos aquecida, sendo coerente com a anomalia positiva de FCLS (menores taxas de liberação de calor latente, Figura 3.3.4.3 a-b) e negativa de RSLS (menos incidência de radiação solar na superfície, Figura 3.3.4.3 c-d). Isso sugere maior cobertura de nuvens na região devido ao aprisionamento dos sistemas transientes, como discutido anteriormente. Essas anomalias vão de acordo com os campos de ROLE e precipitação (que apresentaram, respectivamente, anomalias negativas e positivas nessas regiões, Figura 3.3.4.2 a-d), i.e., mais nebulosidade e precipitação. Durante os extremos máximos de inverno, parte na costa leste do Nordeste do Brasil apresenta anomalia negativa de RSLS e positiva de RTLS (Figura 3.3.4.3 d-f). Isso sinaliza, respectivamente, que havia menos radiação solar incidindo sobre a superfície e menos radiação térmica sendo emitida pela superfície, sendo condizente com a anomalia positiva de precipitação discutida anteriormente.

A partir desses resultados, notamos que os períodos de maior intensidade do ASAS estão associados a trens de ondas provenientes do Oceano Pacífico Equatorial, associados à convecção anômala gerada por anomalias positivas de TSM. Esses trens de ondas resultam no fortalecimento do anticiclone. A análise das anomalias de TSM do Oceano Atlântico Sul também mostrou uma possível influência na intensidade do ASAS. A Intensificação do anticiclone mostrou indícios de impactos sobre a ZCIT, que passou a mostrar um posicionamento mais a norte, e sobre a região de atuação da ZCAS (durante o verão), que apresentou anomalias negativas de precipitação. Anomalias no campo de precipitação e de ROLE sugerem um aprisionamento dos sistemas transientes entre o sul e o sudoeste do ASAS, sendo coerente com seus períodos mais intensos. As variáveis do BE também apresentaram anomalias condizentes com períodos em que o anticiclone está mais intenso. As

anomalias indicam aumento da temperatura entre as Regiões Norte, Nordeste e Sudeste do Brasil no verão (Figura 3.3.4.3 c-e), coerentes com as influências da intensificação do ASAS na ZCIT e região da ZCAS mencionados anteriormente. No Sudeste da AS, nota-se indícios de diminuição da temperatura, ocasionada pelo aprisionamento dos sistemas transientes na região (Figura 3.3.4.3 c-e).

VERÕES EXTREMOS INVERNOS EXTREMOS

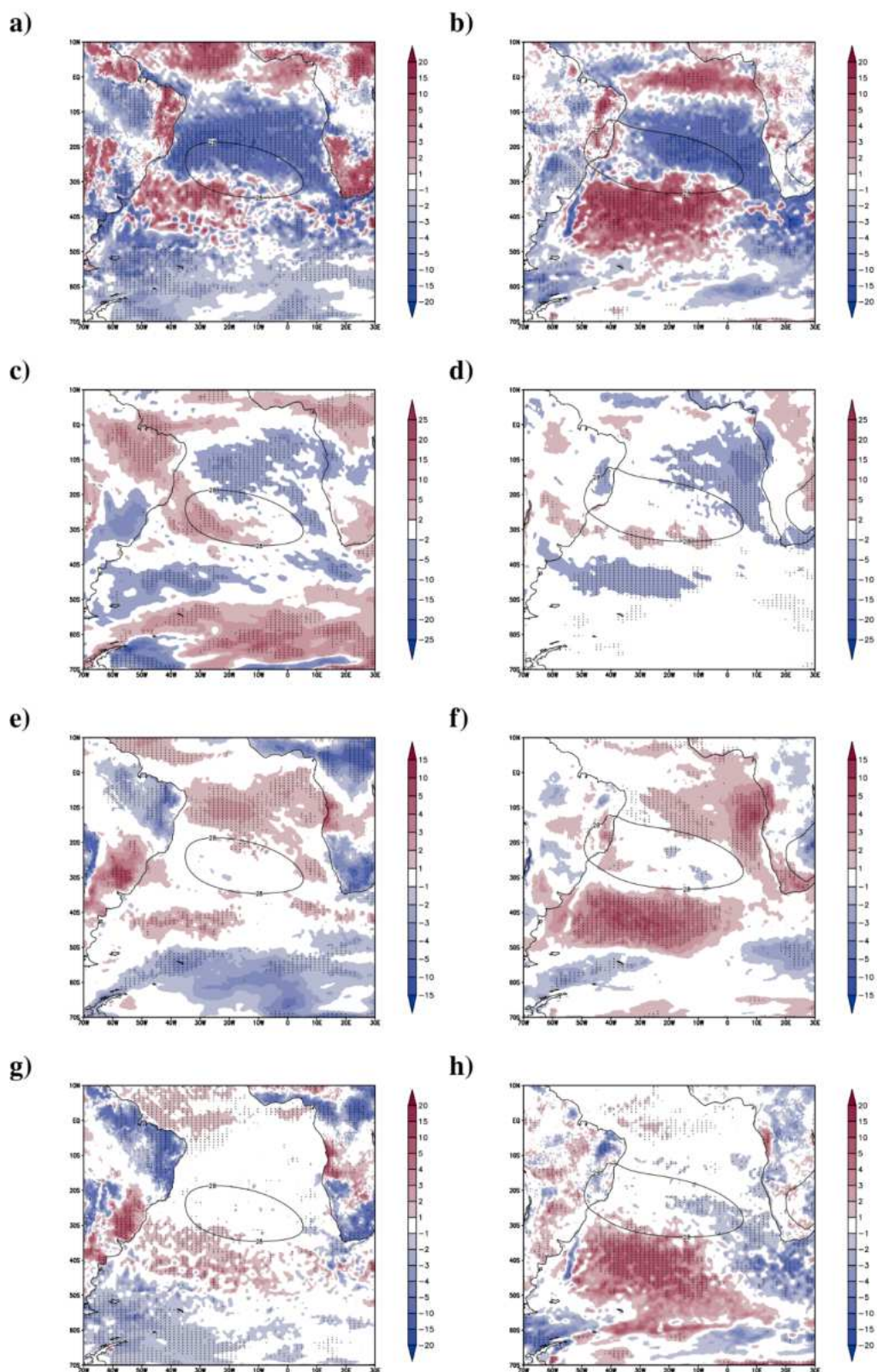


Figura 3.3.4.3 - Compostos da anomalia para o período dos verões e invernos austrais extremo máximo do ASAS: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLS (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é

referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

3.3.5. EXTREMOS MÍNIMOS DE VERÃO E DE INVERNO

Nas Figuras 4 a-d, nota-se a existência de um trem de ondas em médias latitudes em ambas as estações para os compostos de extremos mínimos do ASAS. Durante os extremos mínimos de verão, existe um trem de ondas vindo do Oceano Pacífico Subtropical (Figura 3.3.5.1 a), próximo à Nova Zelândia, que se une ao trem de ondas em médias latitudes no sul do Oceano Pacífico. Esses trens de ondas geram sobre o ASAS anomalia anticiclônica durante os extremos mínimos de verão (Figura 3.3.5.1 a), enquanto nos invernos extremo mínimo a região do ASAS fica entre uma anomalia anticiclônica a norte e ciclônica a sul (Figura 3.3.5.1 b). Na Figura 3.3.5.1 e se observa que esses trens de ondas não geraram convergência ou divergência anômala sobre o ASAS, porém, durante os invernos extremos mínimo, nota-se divergência anômala sobre o anticiclone (Figura 3.3.5.1 f). Com isso, observa-se que esses trens de ondas favoreceram o enfraquecimento do ASAS, como visto pelas anomalias ciclônicas em 850 hPa na região do anticiclone (Figura 3.3.5.1 g-h).

Em contraste com os compostos extremo máximo (Figura 3.3.4.1 i-j), os compostos de anomalia de TSM para o verão e inverno extremo mínimo (Figura 3.3.5.1 i-j) apresentam configuração típica de episódios de La Niña (Philander, 1989; Trenberth, 1997; Grimm, 2003). Entretanto, durante os invernos extremo mínimo, essas anomalias são menos intensas e abrangentes se comparadas com o verão. No verão extremo mínimo (Figura 3.3.5.1 i), observa-se que a região de origem do trem de ondas proveniente da Nova Zelândia apresenta anomalias positivas de TSM, podendo ser a causa do disparo do trem de ondas. No Oceano Atlântico Sul, nota-se a presença de um dipolo de TSM entre o Oceano Atlântico subtropical, com anomalias negativas próximo à costa sudeste da AS e ao ASAS, e anomalias positivas no Oceano Atlântico Sul tropical (Figura 3.3.5.1 i-j). Essas anomalias podem estar associadas a menor abrangência e intensidade do ASAS, desfavorecendo a advecção de águas mais frias para as latitudes tropicais e águas mais quentes para as subtropicais. Além disso, a menor intensidade do ASAS pode ter diminuído a intensidade dos ventos alísios de sudeste

(Carpenedo; Ambrizzi, 2020), diminuindo as taxas de evaporação (Seager et al., 2003) na região tropical, favorecendo anomalias positivas de TSM. Gomes e Freitas (2020) também associaram esse dipolo de TSM a desintensificação do ASAS, devido ao enfraquecimento do ramo de subsidência da Célula de Hadley durante os invernos.

VERÕES EXTREMOS INVERNOS EXTREMOS

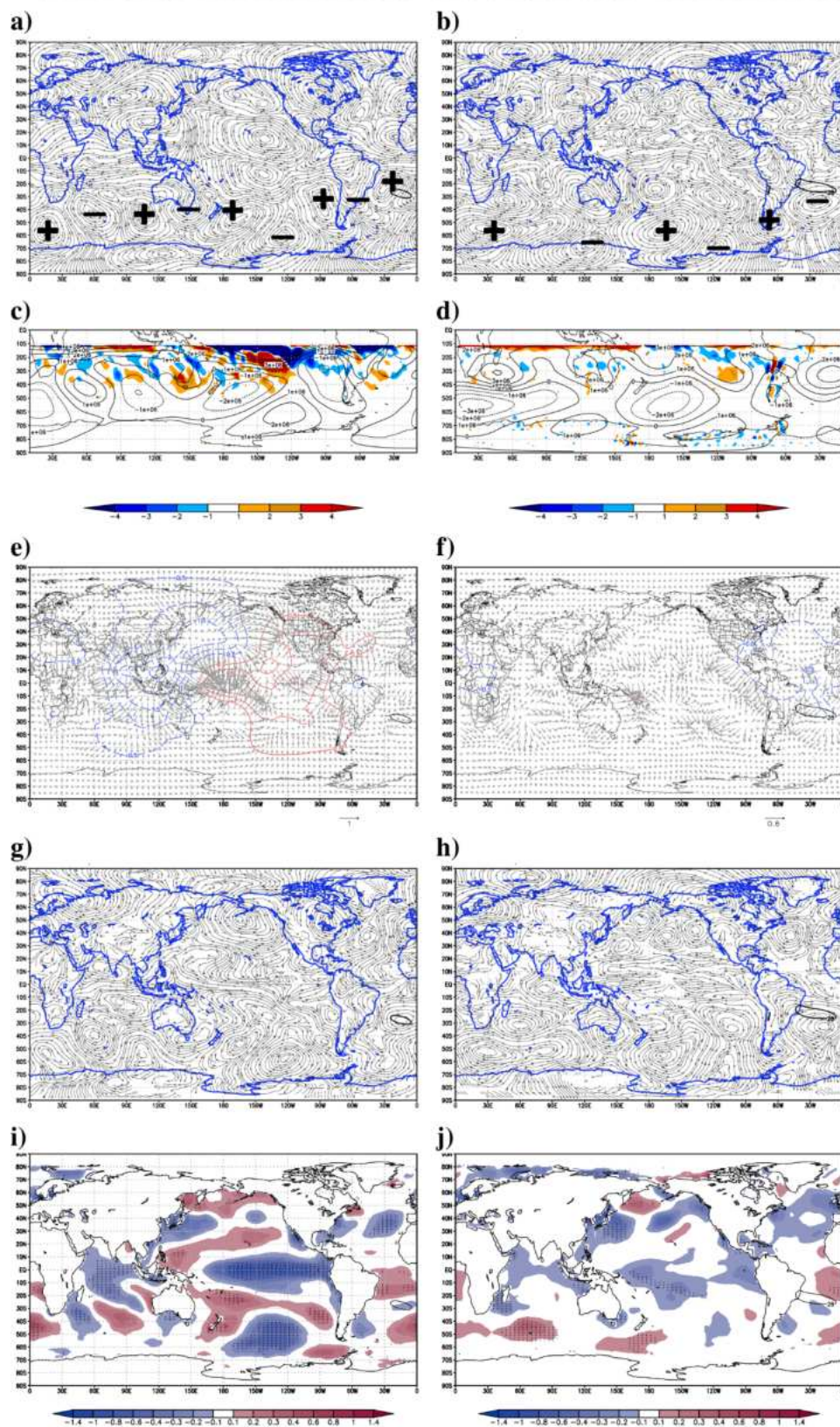


Figura 3.3.5.1 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo mínimo do ASAS: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN (10^{-6} m.s^{-2} - colorido), (e-f) velocidade

potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente (m.s^{-1} - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). Em todas as imagens, exceto c-d, a isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

No Oceano Atlântico Sul, durante os extremos mínimos de verão, não se observa anomalias significativas de precipitação e ROLE na região do ASAS, enquanto nos invernos extremo mínimo, observa-se anomalia positiva de precipitação e negativa de ROLE na região do ASAS, indicando mais nebulosidade nesta região (Figura 3.3.5.2 a-d). Na região de disparo dos trens de ondas tropicais, nota-se aumento da convecção na região (Figuras 5 a-c), gerando divergência anômala em altos níveis (Figura 3.3.5.1 e). A divergência do Fluxo TN (Figura 3.3.5.1 c) confirma a fonte de ondas de Rossby próxima da Nova Zelândia (valores positivos) durante os extremos mínimos de verão. Já para os invernos extremos mínimo, não há indicativos de fontes de onda de Rossby de origem tropical (Figura 3.3.5.1 d, f, j).

Para os períodos dos extremos mínimos de verão, percebe-se indícios de um posicionamento da ZCIT mais ao sul, devido às anomalias positivas de precipitação e negativas de ROLE entre o Oceano Atlântico e norte da AS (Figura 3.3.5.2 a-c). Além disso, há divergência anômala em altos níveis (Figura 3.3.5.1 e), coerente com períodos do ASAS menos intenso (Ferreira e Mello, 2005). Como compensação, para a costa leste do Nordeste do Brasil, nota-se a presença de anomalias positivas de ROLE (Figura 3.3.5.2 c) e negativas de precipitação (Figura 3.3.5.2 a), embora este último não apresente significância estatística. No Oceano Atlântico Sul durante os invernos extremo mínimo, observa-se anomalia positiva de precipitação e negativa de ROLE na região do ASAS (Figura 3.3.5.2 b, d), indicando mais nebulosidade nesta região. Essas anomalias estão de acordo com a divergência anômala observada em altos níveis sobre a região do ASAS (Figura 3.3.5.1 f).

VERÕES EXTREMOS INVERNOS EXTREMOS

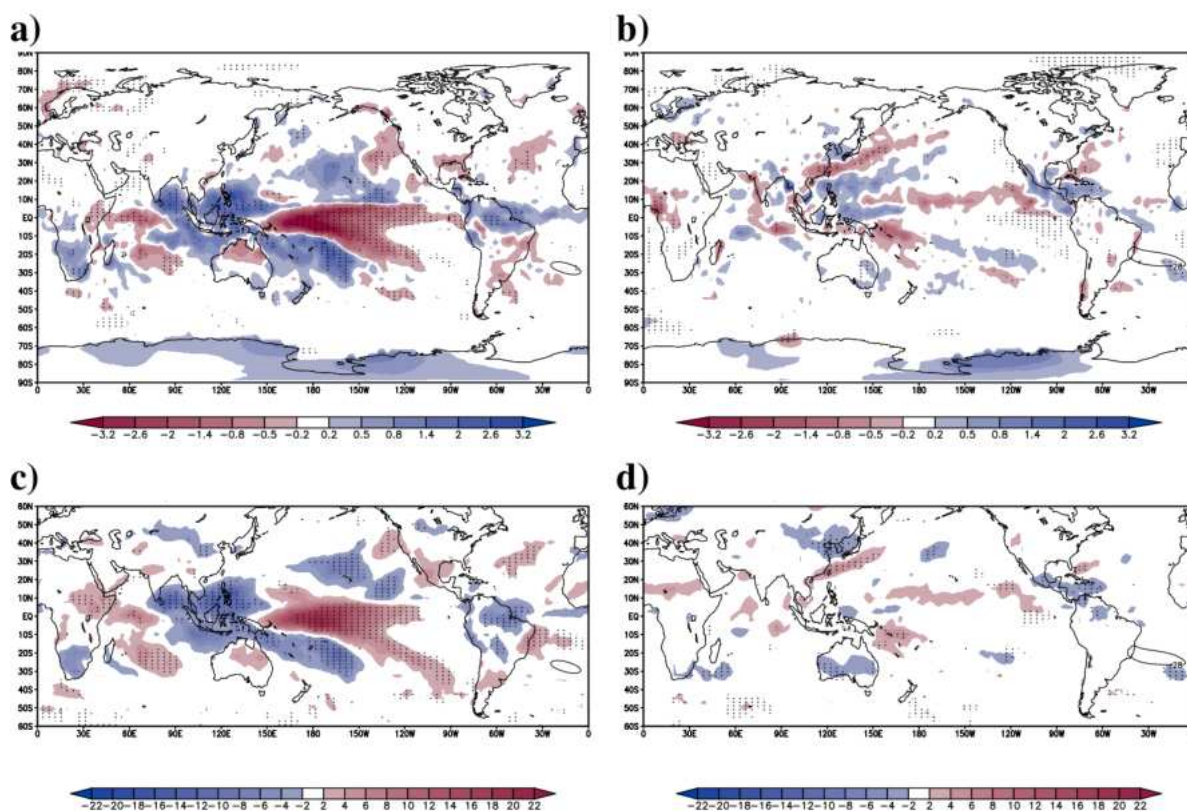


Figura 3.3.5.2 - Compostos de anomalias para o período dos verões e invernos austrais extremo mínimo do ASAS: (a-b) precipitação (mm.dia^{-1}) e (c-d) ROLE (W.m^{-2}). A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

O campo de FCLS (Figura 3.3.5.3 a-b) mostra que entre o centro, sudeste, norte e leste do ASAS houve menores taxas de liberação de calor latente (anomalias positivas) durante os extremos mínimos de verão, e entre o centro, norte e leste do ASAS durante os invernos extremos mínimo. Essa anomalia sugere que na região há menos evaporação durante os períodos menos intensos do ASAS, o que é coerente, uma vez que nessas condições se espera subsidência menos intensa, desintensificando os ventos alísios (Carpenedo; Ambrizzi, 2020), e diminuindo as taxas de evaporação (Seager et al., 2003). Para a área a sul e sudoeste do ASAS, o campo de FCLS (Figura 3.3.5.3 a-b) mostra maiores taxas de liberação de calor latente (anomalia negativa), indicando mais evaporação nessas regiões. Essa maior taxa de

evaporação pode ser explicada pela “pista” de ventos anômalos entre o Mar de Weddell e a AS (Figura 3.3.5.1 g-h). A advecção do ar proveniente do Mar de Weddell diminuiria a quantidade de umidade disponível, aumentando a evaporação, além de auxiliar na diminuição da TSM (Figura 3.3.5.1 i-j).

Na costa leste do Nordeste do Brasil, observa-se anomalias positivas de RSLs (Figuras 6 c-d) e negativas de FCSS e RTLS (Figuras 6 e-f, g-h). Essas anomalias mostram, respectivamente, mais fluxo de calor sensível da superfície para a atmosfera, mais radiação térmica sendo emitida para a atmosfera e mais radiação solar chegando à superfície, indicando menos nebulosidade nesta região. Essas anomalias estão de acordo com as anomalias observadas nos campos de precipitação e ROLE (Figuras 5 a-c), que mostram anomalias negativas de precipitação (em ambas as estações) e positivas de ROLE (somente durante os extremos mínimos de verão) na região. Essas anomalias são coerentes com períodos menos intensos do ASAS, onde se espera menor confluência entre os alísios e a brisa terrestre, diminuindo a precipitação na costa.

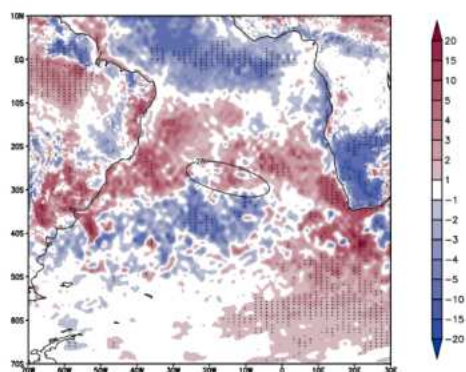
Os campos de RSLs e RTLS (Figuras 6 c,e) mostram, respectivamente, no centro do ASAS com menos radiação solar chegando à superfície (anomalia negativa) e menos radiação térmica sendo emitida pela superfície (anomalia positiva) durante os extremos mínimos de verão. Essas anomalias são condizentes com períodos menos intensos do anticiclone, onde se espera menos subsidência (Figura 3.3.5.3 c-e) e consequentemente mais nebulosidade. No norte e nordeste do ASAS, os campos de RSLs e RTLS mostram, respectivamente, mais radiação solar chegando à superfície (anomalia positiva) e mais radiação térmica sendo emitida pela superfície (anomalia negativa) entre o norte e nordeste do ASAS (Figura 3.3.5.3 c-f). Essas anomalias nos campos do BE sugerem menos nebulosidade sobre essas regiões, o que pode ajudar a explicar a anomalia positiva de TSM observados nessa região (Figura 3.3.5.1 i-j). Já essa menor cobertura de nuvens pode ter sido causada pelos menores índices de evaporação devido à menor intensidade do anticiclone. As variáveis do BE também sugerem um posicionamento mais ao sul da ZCIT durante os extremos mínimos de verão, através das anomalias positivas de FCSS e RTLS (no norte da AS - Figuras 6 c, e). Essas anomalias mostram, respectivamente, menos fluxo de calor sensível para a atmosfera e menos radiação térmica sendo emitida para a atmosfera. Há também anomalias negativas de RSLs (Figura 3.3.5.3 g), que mostra menos radiação solar chegando à superfície. Essas anomalias indicam

que na região havia mais nebulosidade durante esse período, coerente com o posicionamento mais a sul da ZCIT.

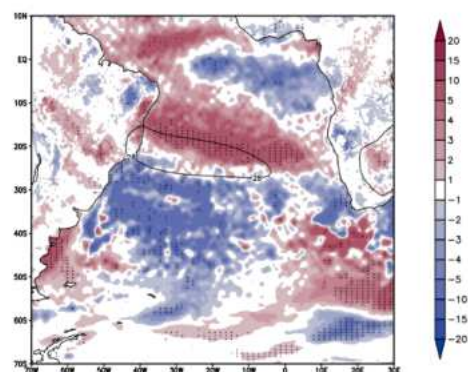
Com esses resultados, podemos observar que os períodos de menor intensidade do ASAS estão associados a diferentes trens de ondas. Durante os extremos máximos de verão, anomalias positivas de TSM no Oceano Pacífico Subtropical serviram como fontes de convecção anômala, que dispararam trens de ondas e posteriormente se juntaram a outro trem de ondas em médias latitudes. Já nos invernos extremos mínimo existem apenas o trem de ondas em médias latitudes. Esses trens de ondas favoreceram o enfraquecimento do anticiclone. As anomalias de TSM do Oceano Atlântico Sul também favoreceram a desintensificação do ASAS. No norte da AS no verão, nota-se aumento da precipitação e indícios de diminuição da temperatura, devido ao posicionamento mais a sul ZCIT, condizente com períodos menos intensos do ASAS. No Centro-Sul da AS, observa-se menos precipitação e indícios de aumento da temperatura no verão, podendo ser causados pelo enfraquecimento do escoamento de norte que transportaria umidade para essas regiões, devido a menor intensidade do ASAS. No litoral leste do Nordeste do Brasil, nota-se anomalias negativas de precipitação e indícios de aumento da temperatura em ambas as estações, condizentes com períodos menos intensos do ASAS. No Sudeste da AS no inverno, observa-se indícios de aumento de temperatura, podendo ter sido causado pelo não aprisionamento dos sistemas transientes na região, o que favoreceria mais radiação solar chegar à superfície.

VERÕES EXTREMOS INVERNOS EXTREMOS

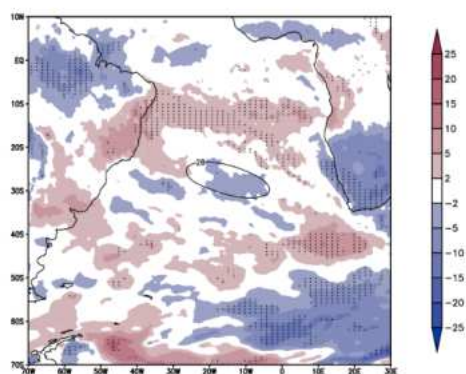
a)



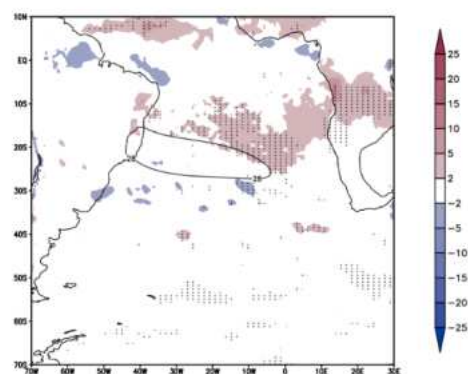
b)



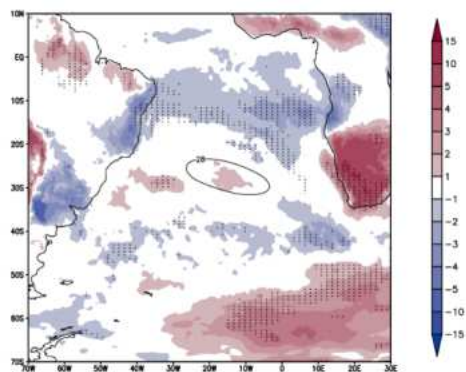
c)



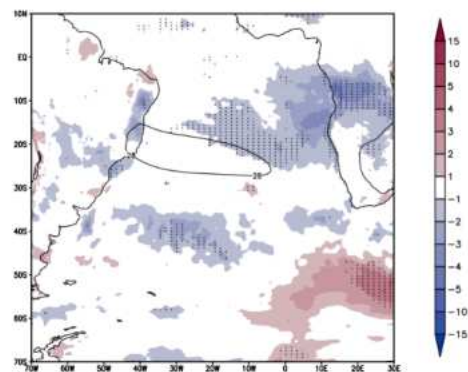
d)



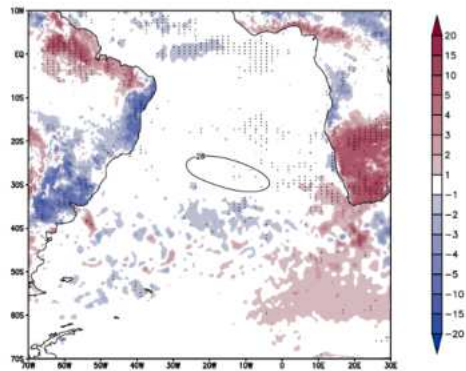
e)



f)



g)



h)

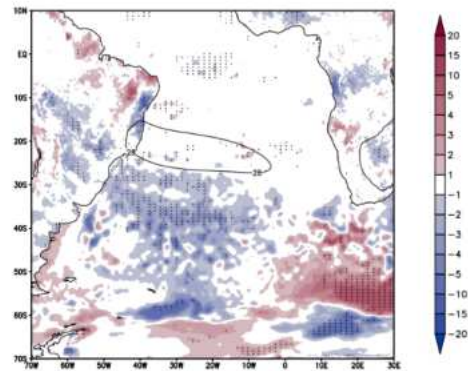


Figura 3.3.5.3 - Compostos da anomalia para o período dos verões e invernos austrais extremo mínimo do ASAS: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLs (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente aos períodos do verão, enquanto a coluna da direita é referente aos períodos do inverno. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

Nos resultados dos períodos que precedem os extremos máximos de verão e inverno, podemos notar que o Oceano Pacífico serviu como fonte de trens de ondas com origem tropical, relacionados a anomalias positivas de TSM que geraram, por sua vez, convecção anômala. Esses trens de ondas se uniram a trens de ondas presentes em médias latitudes, e a junção desses trens de ondas resultou na intensificação do ASAS, o que sugere que os períodos extremos máximos do anticiclone são precedidos por intensificações prévias (S.1). As anomalias observadas nos campos de precipitação, ROLE e BE (S.2 e S.3) se mostraram bastante parecidas entre os períodos extremos e as estações que os precedem, sendo mais um indicativo de que o ASAS apresenta uma intensificação inicial antes de atingir o máximo na estação seguinte.

A partir dos resultados dos períodos precedentes aos extremos mínimos do ASAS podemos notar que existem dois trens de ondas, um de origem tropical, relacionado a anomalias positivas de TSM que geram convergência anômala, e outro em médias latitudes. Esses resultados são semelhantes aos dos períodos de extremos mínimos, exceto o inverno extremo mínimo que não apresentou trens de ondas de origem tropical. Esses trens de ondas resultaram em um enfraquecimento do ASAS, sugerindo que os períodos de extremos mínimos do anticiclone são antecidos por um enfraquecimento prévio de sua intensidade na estação anterior (S.4). Com relação aos campos de anomalia de precipitação, ROLE e BE (S.5 e S.6), nota-se no geral semelhanças entre os períodos de extremos mínimos e as estações que os precedem, corroborando com a hipótese de um enfraquecimento prévio do ASAS.

3.3.6. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo identificar possíveis mudanças no comportamento do ASAS nas últimas décadas, além de identificar padrões relacionados a períodos anômalos do anticiclone, e como esses padrões influenciam o clima da AS. Com relação ao comportamento do ASAS, a análise dos seus pontos extremos mostrou que, no geral, há uma tendência de expansão do anticiclone, porém ela difere entre as estações do ano. Durante o verão, o ASAS apresenta tendência de deslocamento para oeste, enquanto nas outras estações existe a tendência de expansão para todas as direções, exceto para norte no outono e na primavera. Trabalhos anteriores, como Hu et al, (2018) e Reboita et al. (2019), já identificaram tendências de deslocamentos e os associaram a mudanças na Célula de Hadley. Já para o centro do ASAS, verificou-se a tendência de aumento de sua intensidade em todas as estações, com tendência de deslocamento para leste no outono. Essas mudanças observadas no comportamento do anticiclone podem influenciar o período ativo da monção da AS, diminuindo os totais pluviométricos, principalmente durante o verão, como o observado no verão de 2014/2015 (Reboita et al., 2015; Coelho et al, 2016).

Nos casos dos verões e invernos extremos máximos, o Oceano Pacífico Equatorial se mostrou fonte de trens de ondas de Rossby, que se propagam em direção a AS e Oceano Atlântico Sul, influenciando na intensidade do ASAS. Esses trens de ondas têm origem sobre anomalias positivas de TSM, indicando que sua origem está relacionada à convergência anômala nesta região. Sobre a região do anticiclone, observa-se convergência em altos níveis e um padrão de bloqueio, intensificando a subsidência e contribuindo para o aumento da intensidade do ASAS, o que é observado com a anomalia anticiclônica em baixos níveis. No Oceano Atlântico Sul, observa-se a presença de um gradiente negativo de TSM entre o Oceano Atlântico extratropical/subtropical, favorecendo o fortalecimento do ASAS durante o inverno, e estando relacionado a secas na região sudeste do Brasil durante o verão. As variáveis do BE estão condizentes com os períodos mais intenso do ASAS, mostrando mais evaporação e menos nebulosidade a norte, e o cenário oposto a sul do anticiclone. Na região da ZCAS, foram observadas anomalias negativas de precipitação e menos nebulosidade, enquanto no sudeste da AS observa-se anomalias positivas de precipitação e mais nebulosidade, coerentes com o padrão de bloqueio e consequente aprisionamentos dos sistemas transientes na região. Foi observado que a ZCIT apresentou um posicionamento mais

a norte, diminuindo a precipitação na costa da região norte e norte do nordeste, enquanto na costa leste do nordeste, tem-se anomalias positivas de precipitação durante o inverno.

Nos casos dos verões extremos mínimos, tem-se dois trens de ondas, um originado próximo a Nova Zelândia, devido a convecção anômala causada pela anomalia positiva de TSM, que se une a outro trem de ondas em médias latitudes, enquanto nos invernos extremos mínimo existem apenas o trem de ondas em médias latitudes. No Oceano Atlântico Sul, observa-se a presença de um gradiente positivo de TSM entre o Oceano Atlântico extratropical/subtropical, o que favorece a desintensificação do ASAS durante o inverno, enquanto durante o verão esse dipolo é relacionado ao enfraquecimento do anticiclone. O BE se mostra coerente com períodos menos intensos do ASAS, mostrando menos evaporação e mais nebulosidade a norte do anticiclone, enquanto a sul se observa mais evaporação. Na AS, nota-se um posicionamento mais ao sul da ZCIT durante os verões, aumentando a precipitação na costa da região norte e norte do nordeste, enquanto na costa leste do Nordeste, tem-se anomalias negativas de precipitação.

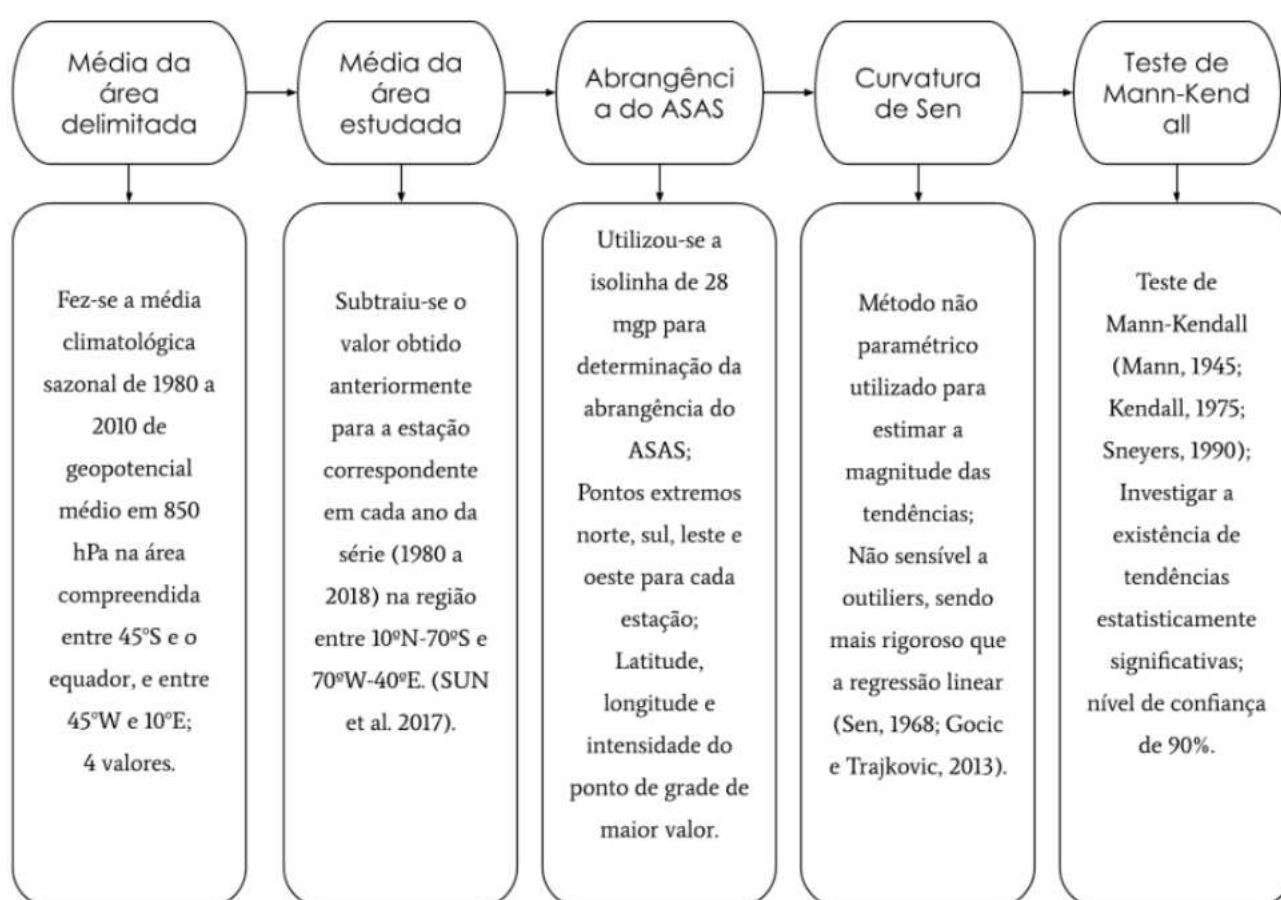
Para as estações que precedem os verões e invernos extremos, foram observados trens de ondas de origem tropical e em médias latitudes. Nas estações que antecedem os períodos extremos máximos (mínimos), observou-se que esses trens de ondas favoreceram a convergência (divergência), intensificando (desintensificando) previamente o ASAS. Nos campos de anomalia de precipitação e ROLE, os padrões observados se mostraram semelhantes ao ocorrido nos períodos anômalos, além de serem condizentes com períodos em que o ASAS esteja mais (menos) intenso. Já para as variáveis do BE, houve algumas diferenças entre os períodos extremos e as estações que os antecederam, mas de uma forma geral há muitas semelhanças entre os períodos extremos e as estações que os antecederam. Esses resultados levam a crer que o ASAS apresenta uma intensificação (desintensificação) prévia antes de atingir seu máximo (mínimo) na estação seguinte.

Portanto, este estudo constatou que houve mudanças no comportamento do ASAS nas últimas décadas, tanto em termos de área de abrangência quanto de intensidade, apresentando tendência de aumento em ambos. Com relação aos períodos extremos do anticiclone, foi constatado que trens de ondas acarretam nas mudanças da intensidade do ASAS, e conseqüentemente no tempo e clima da AS. Alguns desses trens de ondas estão associados a anomalias positivas de TSM, indicando influências remotas na intensidade do ASAS. Nas

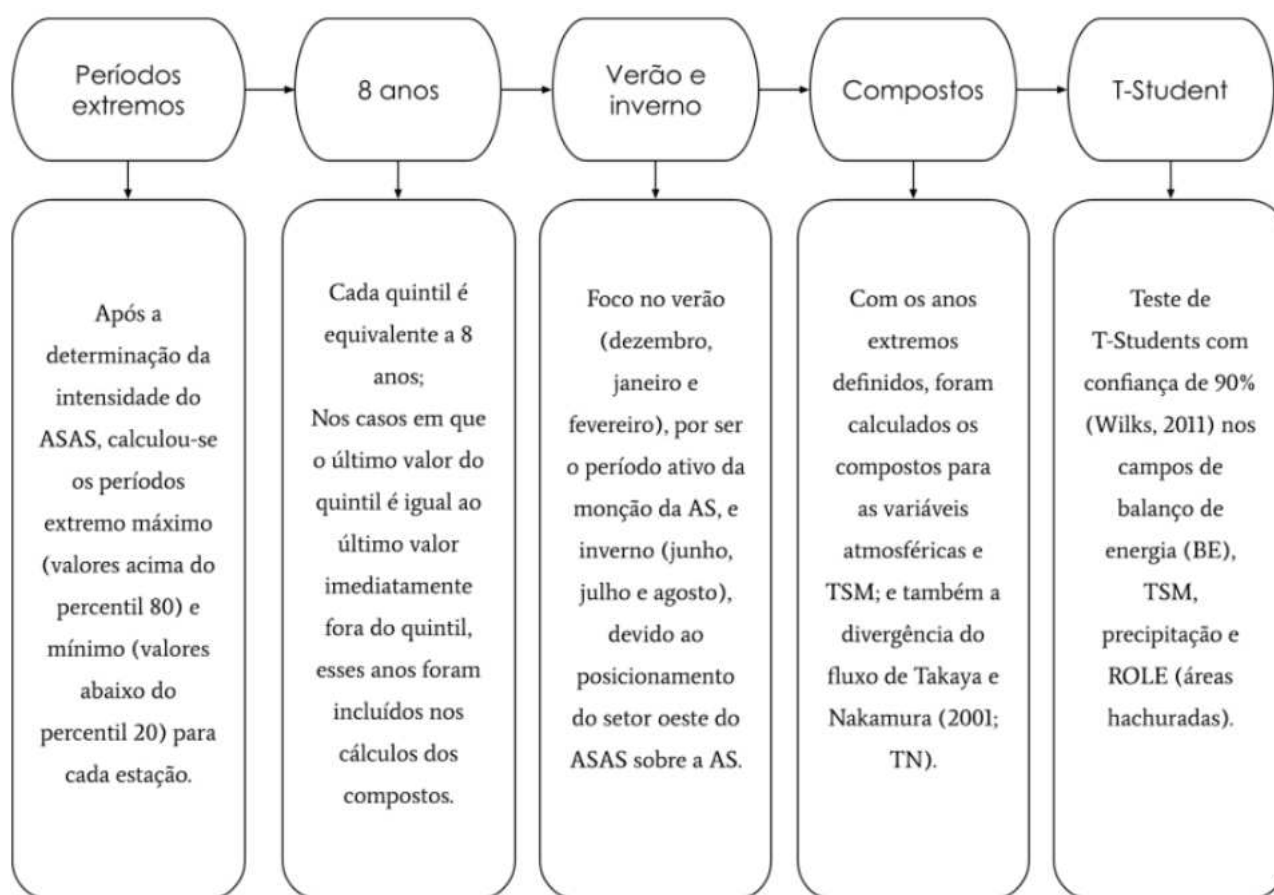
estações que precedem os períodos extremos, nota-se que há bastante semelhança com os períodos extremos, sugerindo que a modulação da intensidade do anticiclone ocorre desde a estação precedente ao período extremo.

3.3.7. MATERIAL SUPLEMENTAR

3.3.7.1. FLUXOGRAMA REFERENTE À METODOLOGIA



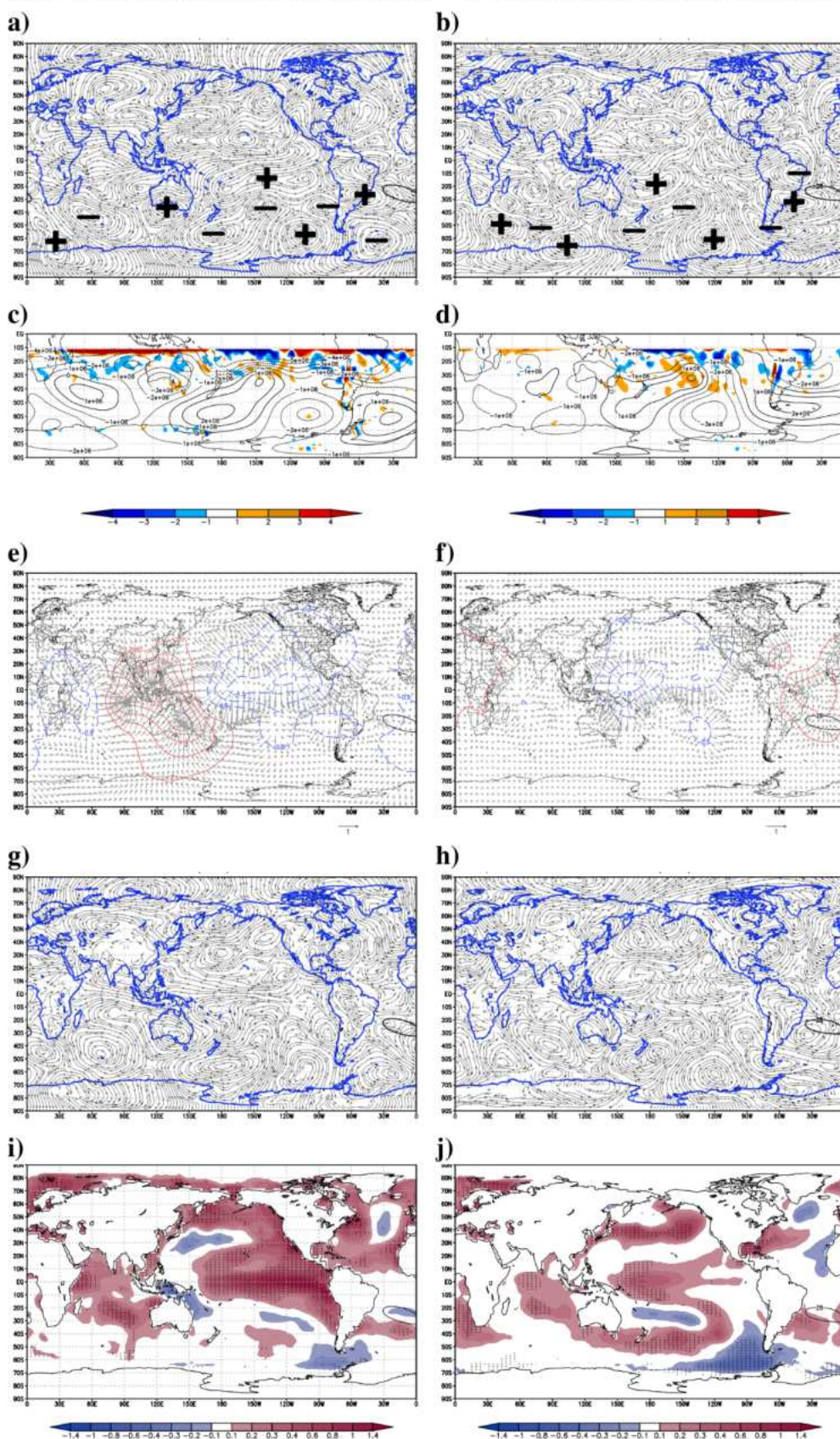
S.1 - Fluxograma resumindo a metodologia referente a determinação da abrangência do ASAS.



S.2 - Fluxograma resumindo a metodologia referente a determinação dos períodos extremos do ASAS.

3.3.7.2. CONDIÇÕES PRECEDENTES AOS EXTREMOS MÁXIMOS DE VERÃO E INVERNO

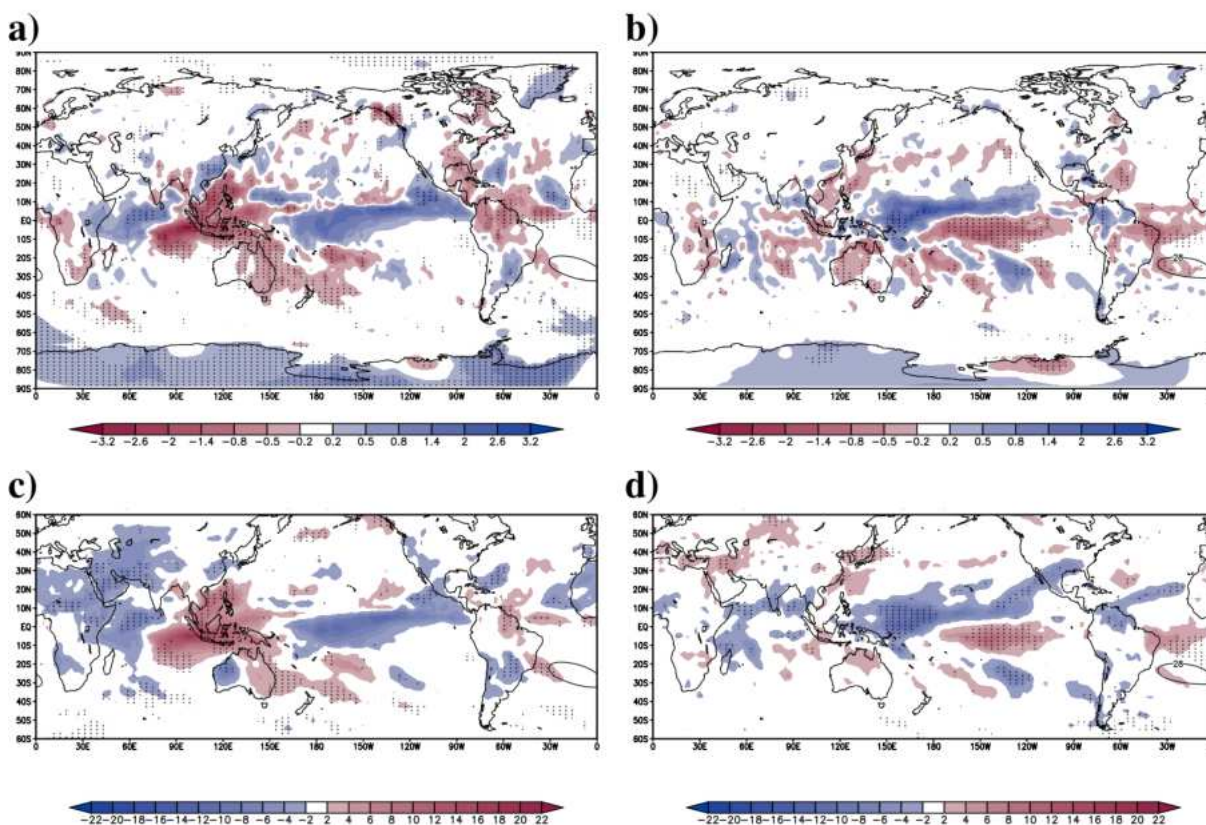
PRIMAVERAS PRECEDENTES OUTONOS PRECEDENTES



S.3 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os extremos máximos de verões e de invernos: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função

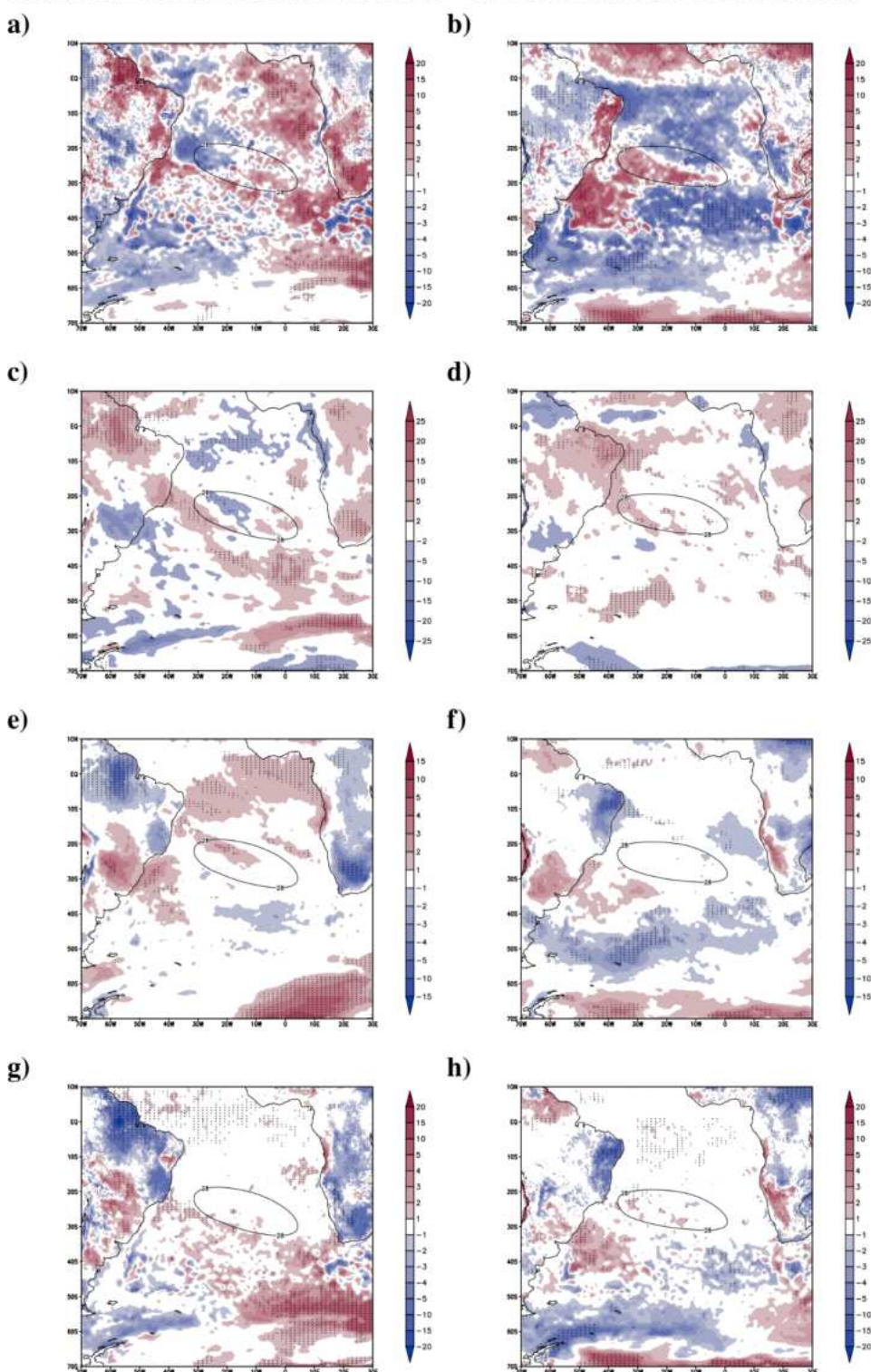
corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN (10^{-6} m.s^{-2} - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente (m.s^{-1} - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os extremos máximos de verão, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os extremos máximos de invernos. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

PRIMAVERAS PRECEDENTES OUTONOS PRECEDENTES



S.4 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os extremos máximos de verões e de invernos: (a-b) precipitação ($\text{mm}.\text{dia}^{-1}$) e (c-d) ROLE ($\text{W}.\text{m}^{-2}$). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os extremos máximos de verão, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os extremos máximo de invernos. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

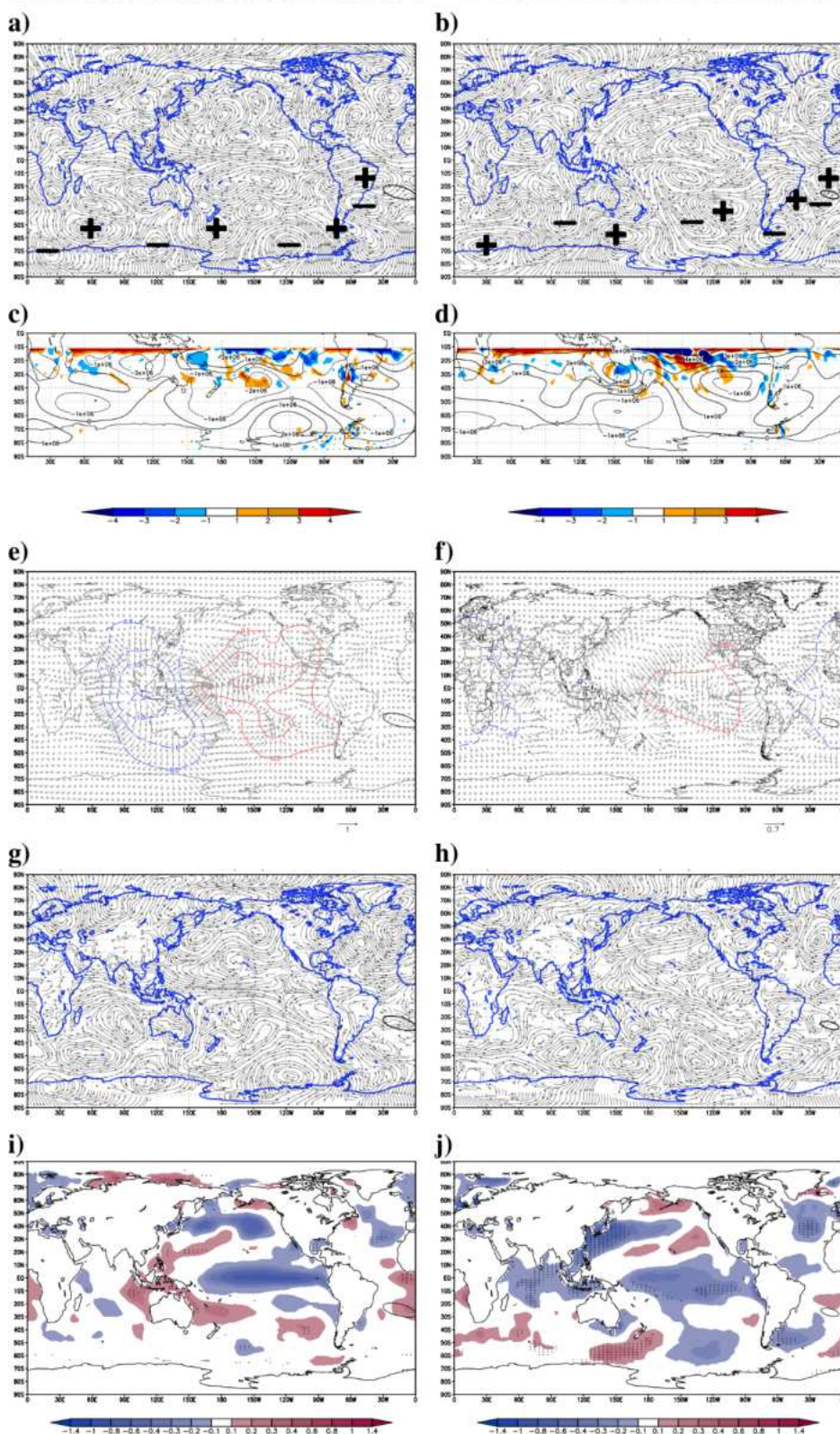
PRIMAVERAS PRECEDENTES OUTONOS PRECEDENTES



S.5 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os extremos máximos de verões e de invernos: (a-b) FCLS (W.m^{-2} - colorido), (c-d) RSLs (W.m^{-2} - colorido), (e-f) RTLS (W.m^{-2} - colorido), (g-h) FCSS (W.m^{-2} - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os extremos máximos de verão, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os extremos máximos de inverno. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

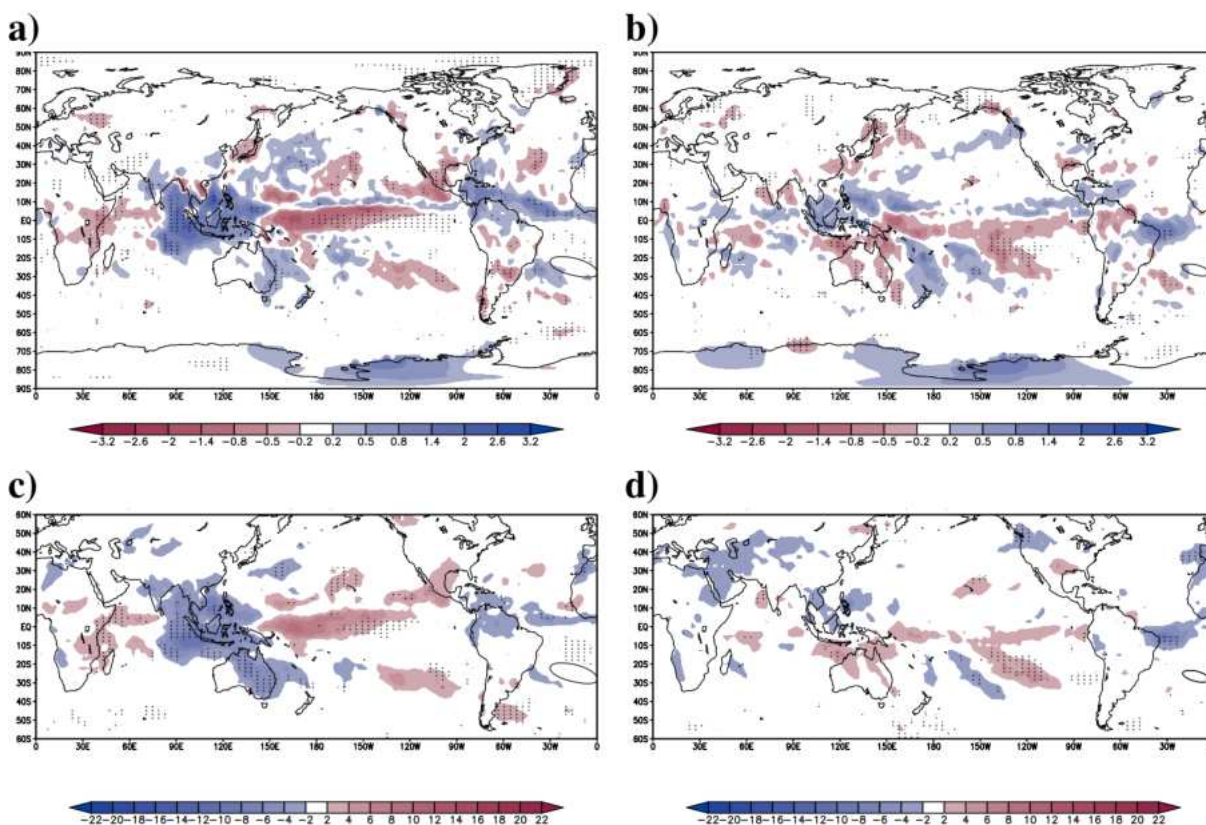
3.3.7.3. CONDIÇÕES PRECEDENTES AOS EXTREMOS MÍNIMOS DE VERÃO E INVERNO

PRIMAVERAS PRECEDENTES OUTONOS PRECEDENTES



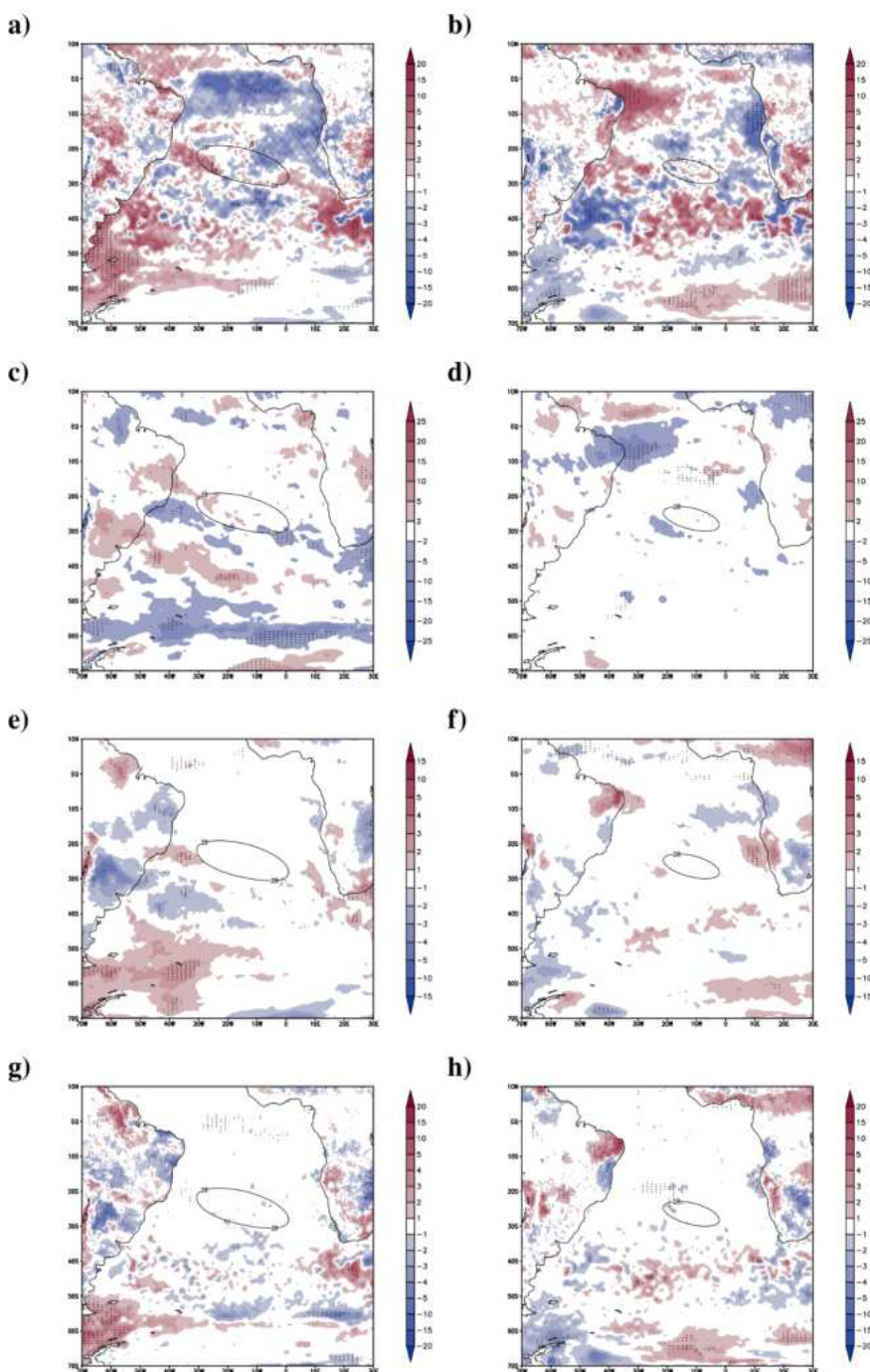
S.6 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo mínimo: (a-b) linhas de corrente em 200 hPa, (c-d) função corrente ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ - linha) 200 hPa e divergência do Fluxo TN ($10^{-6} \text{ m}.\text{s}^{-2}$ - colorido), (e-f) velocidade potencial ($10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - contorno) e vento divergente ($\text{m}.\text{s}^{-1}$ - vetor) em 200 hPa, (g-h) linhas de corrente em 850 hPa, (i-j) TSM ($^{\circ}\text{C}$). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os extremos mínimos de verão, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os extremos mínimos de inverno. Na imagem da TSM (i-j), as áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. Nas imagens a-b, os sinais + indicam anomalia anticiclônica e - anomalia ciclônica.

PRIMAVERAS PRECEDENTES OUTONOS PRECEDENTES



S.7 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo mínimo: (a-b) precipitação ($\text{mm}.\text{dia}^{-1}$) e (c-d) ROLE ($\text{W}.\text{m}^{-2}$). A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os extremos mínimos de verão, enquanto a coluna da esquerda é referente aos outonos que precedem os extremos mínimos de inverno. A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

PRIMAVERAS PRECEDENTES OUTONOS PRECEDENTES



S.8 - Compostos de anomalias para as estações defasadas que precedem os verões e invernos extremo mínimo: (a-b) FCLS ($W.m^{-2}$ - colorido), (c-d) RSLs ($W.m^{-2}$ - colorido), (e-f) RTLS ($W.m^{-2}$ - colorido), (g-h) FCSS ($W.m^{-2}$ - colorido). A isolinha (28 mgp) é referente a abrangência do ASAS nos períodos. A coluna da esquerda é referente às primaveras que precedem os extremos mínimos de verão, enquanto a coluna da direita é referente aos outonos que precedem os extremos mínimos de inverno. As áreas hachuradas possuem 90% de confiança (t-student).

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R.; HUFFMAN, G.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P.; NELKIN, E. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). **Journal of hydrometeorology**, v. 4, n. 6, p. 1147-1167, 2003. DOI: 10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2

AMARAL, P. F.; VASCONCELLOS, F. C.; PIZZOCHERO, R. M.; SILVA, W. L.; SILVA, F. P.; TEDESCHI, R. G.; PARISE, C. K. Seasonal And Decadal Trends In The Positioning And Magnitude Of The South Atlantic Subtropical Anticyclone For The Period 1980-2018, 2025. (no prelo)

AMORIM, A.; SILVA, C.; CHAVES, R. Temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical e a precipitação do leste do Nordeste do Brasil. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal, Brasil, 2014.

BERNARDINO, B. S.; VASCONCELLOS, F. C.; NUNES, A. M. B. Impact of the equatorial Pacific and South Atlantic SST anomalies on extremes in austral summer precipitation over Grande river basin in Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. e131-e143, 2018. DOI: 10.1002/joc.5358

BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Simple Practices in Climatological Analyses: A Review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 311-320, 2017. DOI: 10.1590/0102-77863230001. DOI: 10.1007/s00382-013-1832-7

BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; REBOITA, M. S. Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 1553-1568, 2014.

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. South Atlantic Subtropical Anticyclone Associated with the Southern Annular Mode and Climate Impacts in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 605-613, 2020. DOI: 10.1590/0102-77863540066

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T.; SILVA, R. C. Sea ice in the Weddell Sea and its relationship with the South Atlantic Subtropical High and precipitation in South America. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, p. e20211623, 2022. DOI: 10.1590/0001-3765202220211623

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2

COELHO, C. A.; DE OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11, p. 3737-3752, 2016. DOI: 10.1007/s00382-015-2800-1

CÓRDOVA, M.; CÉLLERI, R.; VAN DELDEN, A. Dynamics of precipitation anomalies in tropical south America. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 972, 2022. DOI: 10.3390/atmos13060972

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. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553–597, 2011. DOI: 10.1002/qj.828

DÍAZ, A.; ACEITUNO, P. Atmospheric circulation anomalies during episodes of enhanced and reduced convective cloudiness over Uruguay. **Journal of climate**, v. 16, n. 19, p. 3171-3185, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<3171:ACADEO>2.0.CO;2

FAHAD, A. A.; BURLS, N. J. The influence of direct radiative forcing versus indirect sea surface temperature warming on southern hemisphere subtropical anticyclones under global warming. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 9, p. 2333-2350, 2022. DOI: 10.1007/s00382-021-06006-1

FAHAD, A. A.; BURLS, N. J.; SWENSON, E. T.; STRAUS, D. M. The Influence of South Pacific Convergence Zone Heating on the South Pacific Subtropical Anticyclone. **Journal of Climate**, v. 34, p. 3787–3798, 2021. DOI : 10.1175/JCLI-D-20-0509.1.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Main atmospheric systems acting over the Northeastern region of Brazil and the influence of Pacific and Atlantic Oceans on the region climate. **Revista brasileira de climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Position of the South Atlantic Anticyclone and its impact on surface conditions across Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 3, p. 535-553, 2018. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0178.1

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and planetary change**, v. 100, p. 172-182, 2013. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.014

GOMES, L. M. J.; FREITAS, A. C. V. Changes in the Regional Hadley Circulation and the South Atlantic Subtropical High under a Global Warming Scenario. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 3, 2020. DOI: 10.11137/2020_3_227_239

GONZALEZ, P. L. M.; VERA, C. S. Summer precipitation variability over South America on long and short intraseasonal timescales. **Climate dynamics**, v. 43, p. 1993-2007, 2014. DOI: 10.1007/s00382-013-2023-2

GOZZO, L. F.; PALMA, D. S.; DE SOUZA CUSTÓDIO, M.; DRUMOND, A. Climate Patterns Associated to Drought events in Eastern São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v28i0.76268

GOZZO, L. F., DRUMOND, A., PAMPUCH, L. A., AMBRIZZI, T., CRESPO, N. M., REBOITA, M. S., BIER, A. A., CARPENEDO, C. B., BUENO, P. G., PINHEIRO, H. R., CUSTODIO, M., d S., KUKI, C. A. C., TOMAZIELLO, A. C. N., GOMES, H. B, da ROCHA, R. P., COELHO, C. A. S. & PIMENTEL, R. D. M. Intraseasonal drivers of the 2018 drought over São Paulo, Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, p. 852824, 2022. DOI: 10.3389/fclim.2022.852824

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2

HE, C.; WU, B.; ZOU, L.; ZHOU, T. Responses of the summertime subtropical anticyclones to global warming. **Journal of Climate**, v. 30, n. 16, p. 6465-6479, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0529.1

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, M.; DE CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVÁ, M.; KEELEY, S.; LALOYLAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; DE ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J. N. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803

HOFMANN, G. S.; SILVA, R. C.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, L. F. B.; ALVES, R. J. V.; HASENACK, H.; SCHOSSLER, V.; AQUINO, F. E.; CARDOSO, M. F. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 11236, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-38174-x

HU, X.; EICHNER, J.; GONG, D.; BARREIRO, M.; KANTZ, H. Combined impact of ENSO and Antarctic Oscillation on austral spring precipitation in Southeastern South America

(SESA). **Climate Dynamics**, v. 61, n. 1, p. 399-412, 2023. DOI: 10.1007/s00382-022-06592-8

HUANG, B.; THORNE, P. W.; BANZON, V. F.; BOYER, T.; CHEPURIN, G.; LAWRIEMORE, J. H.; MENNE, M. J.; SMITH, T. M.; VOSE, R. S.; ZHANG, H. M. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. **Journal of Climate**, v. 30, n. 20, p. 8179-8205, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1

HU, Y.; HUANG, H.; ZHOU, C.. Widening and weakening of the Hadley circulation under global warming. **Science Bulletin**, v. 63, n. 10, p. 640-644, 2018. DOI: 10.1016/j.scib.2018.04.020

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S.L., PÉAN, C., BERGER, S., CAUD, N., CHEN, Y., GOLDFARB, L., GOMIS, M.I., HUANG, M., LEITZELL, K., LONNOY, E., MATTHEWS, J.B.R., MAYCOCK, T.K., WATERFIELD, T., YELEKÇİ, O., YU, R., & ZHOU, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 2391, 2021. DOI:10.1017/9781009157896.

KENDALL, M. Rank Correlation Methods. **London: Charles Griffin**, 1975.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p. 488-498, 1980. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2

LIEBMANN, B.; SMITH, C. A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 6, p. 1275–1277, 1996.

LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; CARVALHO, L. M. V. Subseasonal variations of rainfall in South America in the vicinity of the low-level jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic convergence zone. **Journal of**

climate, v. 17, n. 19, p. 3829-3842, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<3829:SVORIS>2.0.CO;2

LIU, Y.; WU, G.; REN, R. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. **Journal of Climate**, v. 17, n. 4, p. 682-698, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0682:RBTSAA>2.0.CO;2

LUIZ-SILVA, W.; GARCIA, K.C. Sustainable future and water resources: a synthesis of the Brazilian hydroelectricity sector in face of climate change. **Sustainable Water Resources Management**, v. 8, n. 120, 2022. DOI: 10.1007/s40899-022-00711-3

LUIZ-SILVA, W., DA SILVA, F. P., DERECHYNSKI, C. P., & de ALMEIDA FRANÇA, J. R. Towards a Link between Climate Extremes and Thermodynamic Patterns in the City of Rio de Janeiro-Brazil: Climatological Aspects and Identified Changes. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 11, n. 8, p. 131-160, 2023. DOI: 10.4236/gep.2023.118008

LUIZ-SILVA, W., & OSCAR-JÚNIOR, A. C. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. **Natural Hazards**, v. 114, n. 1, p. 713-732, 2022. DOI:10.1007/s11069-022-05409-5

JAIN, S. K., & KUMAR, V. Trend analysis of rainfall and temperature data for India. **Current Science**, p. 37-49, 2012.

MÄCHEL, H.; KAPALA, A.; FLOHN, H. Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 18, n. 1, p. 1-22, 1998. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199801)18:1<1::AID-JOC225>3.0.CO;2-A

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245– 259, 1945. DOI: 10.2307/1907187

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1472, n. 1, p. 5-20, 2020. DOI: 10.1111/nyas.14307

MATTINGLY, K. S.; MOTE, T. L. Variability in warm-season atmospheric circulation and precipitation patterns over subtropical South America: relationships between the South Atlantic convergence zone and large-scale organized convection over the La Plata basin. *Climate Dynamics*, v. 48, p. 241-263, 2017. DOI: 10.1007/s00382-016-3072-0

MO, K. C.; GHIL, M.. Statistics and dynamics of persistent anomalies. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 44, n. 5, p. 877-902, 1987. DOI: 10.1175/1520-0469(1987)044<0877:SADOPA>2.0.CO;2

MO, K. C.; HIGGINS, R. W. The Pacific–South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, v. 126, n. 6, p. 1581-1596, 1998. DOI: 10.1175/1520-0493(1998)126<1581:TPSAMA>2.0.CO;2

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review*, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2

PARISE, C. K.; PEZZI, L. P.; CARPENEDO, C. B.; VASCONCELLOS, F. C.; BARBOSA, W. L.; LIMA, L. G. D. Sensitivity of South America Climate to Positive Extremes of Antarctic Sea Ice. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 94, p. e20210706, 2022. DOI: 10.1590/0001-3765202220210706

PENALBA, O. C.; VARGAS, W. M. Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 24, n. 12, p. 1565-1580, 2004. DOI: 10.1002/joc.1069

PENNA, A. C.; TORRES, R. R.; GARCIA, S. R.; MARENGO, J. A. Moisture flows on Southeast Brazil: Present and future climate. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E935-E951, 2021. DOI: 10.1002/joc.6738

PHILANDER, S. G. El Niño, La Niña, and the southern oscillation. **International geophysics series**, v. 46, p. X-289, 1989.

PÉREZ-ALARCÓN, A., COLL-HIDALGO, P., FERNÁNDEZ-ALVAREZ, J. C., SORÍ, R., DA ROCHA, R. P., REBOITA, M. S., NIETO, R. & GIMENO, L. Quantifying the related precipitation and moisture sources in the lifecycle of subtropical cyclones in the South Atlantic basin. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 2024. DOI: 10.1002/qj.4734

PÉREZ-ALARCÓN, A., COLL-HIDALGO, P., FERNÁNDEZ-ALVAREZ, J. C., TRIGO, R. M., NIETO, R., & GIMENO, L. The rare case of Hurricane Catarina (2004) over the South Atlantic Ocean: The origin of its precipitation through a Lagrangian approach. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 149, n. 752, p. 1038-1055, 2023. DOI: 10.1002/qj.4452

REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, D. D.; FREITAS, C. D.; OLIVEIRA, G. D.; PEREIRA, R. D. A. Synoptic pattern anomalies of the atmosphere over South America in January 2014 and 2015. **Revista brasileira de energias renováveis**, v. 4, n. 4, 2015.

REBOITA, M. S., RODRIGUES, M., ARMANDO, R., FREITAS, C., MARTINS, D., & MILLER, G. The causes of semi-aridity in the Northeast “Sertão”. **Brazilian Journal Climatology**, v. 19, p. 254-277, 2016. DOI: 10.5380/abclima.v19i0.42091

REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P. D., & AMBRIZZI, T. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010. DOI: 10.1590/S0102-77862010000200004

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B. A.; PINHEIRO, R. F.; DA ROCHA, R. P. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019. DOI: 10.3389/feart.2019.00008

REBOITA, M. S.; TEODORO, T. A.; FERREIRA, G. W. S.; SOUZA, C. A. Life cycle of the South American monsoon system: present and future climate. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.15, n. 01, p. 343-358, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.1.p343-358

REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; SILVA, W. L.; SANTOS, R.; CONFALONIERI, U.. Trends in Extreme Precipitation over Espírito Santo State - Southeast Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 365-381, 2018. DOI: 10.11137/2018_1_365_381

REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C.. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021. DOI: doi.org/10.1002/joc.7119

RODRIGUES, R. R.; CAMPOS, E. J. D.; HAARSMA, R. The impact of ENSO on the South Atlantic subtropical dipole mode. **Journal of Climate**, v. 28, n. 7, p. 2691-2705, 2015. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00483.1

RODRIGUES, R. R., HAARSMA, R. J., CAMPOS, E. J., & AMBRIZZI, T. The impacts of inter–El Niño variability on the tropical Atlantic and Northeast Brazil climate. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3402-3422, 2011. DOI: 10.1175/2011JCLI3983.1

RODWELL, M. J.; HOSKINS, B. J. Subtropical anticyclones and summer monsoons. **Journal of Climate**, v. 14, n. 15, p. 3192-3211, 2001. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<3192:SAASM>2.0.CO;2

SANTOS, T. C. D.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B. Investigação da Relação entre Variáveis Atmosféricas e a Concentração de MP 10 E O 3 no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 631-645, 2018. DOI: 10.1590/0102-7786334006

SEAGER, R.; MURTUGUDDE, R.; NAIK, N.; CLEMENT, A.; GORDON, N.; MILLER, J. Air–sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. **Journal of Climate**, v. 16, n. 12, p. 1948-1966, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<1948:AIATSC>2.0.CO;2

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American statistical association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J.. CHARACTERIZATION OF THE SOUTH ATLANTIC CONVERGENCE ZONE IN RECENT ATMOSPHERIC FIELDS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. DOI: 10.5380/abclima.v25i0.64101

SNEYERS, R. On the statistical analysis of series of observations. World Meteorological Organization, Geneva. 1990.

STERL, A.; HAZELEGER, W.. Coupled variability and air-sea interaction in the South Atlantic Ocean. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 559-571, 2003. DOI: 10.1007/s00382-003-0348-y

SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279-3296, 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0705.1

TAKAYA, K.; NAKAMURA, H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 58, n. 6, p. 608-627, 2001. DOI: 10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2

TRENBERTH, K. E. The definition of el nino. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2778, 1997. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2

VALLIS, G. K., ZURITA-GOTOR, P., CAIRNS, C., & KIDSTON, J. Response of the large-scale structure of the atmosphere to global warming. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 690, p. 1479-1501, 2015. DOI: 10.1002/qj.2456

VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 21-26, 2010. DOI: 10.1002/asl.247

VASCONCELLOS, F. C.; SOUZA, J. N. The anomalous wet 2020 southeast Brazil austral summer: characterization and possible mechanisms. **Atmósfera**, v. 35, n. 1, p. 27-38, 2022. DOI: 10.20937/atm.52919

VASCONCELLOS, F. C.; DE SOUZA, J. N.; DERECHYNSKI, C. P.; LUIZ-SILVA, W., DA SILVA, F. P.; PARISE, C. K. Warming trends of southwestern Atlantic SST and the summer's warmest SST's impact on South American climate. **International Journal of Climatology**, v. 43, n. 12, p. 5604-5619, 2023. DOI: 10.1002/joc.8163

VENEGAS, S. A.; MYSAK, L. A.; STRAUB, D. N. Atmosphere–ocean coupled variability in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 10, n. 11, p. 2904-2920, 1997. DOI: 10.1175/1520-0442(1997)010<2904:AOCVIT>2.0.CO;2

VIEIRA, C. A.; CUPOLILO, F. Estudo da atuação do anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS) no Parque Estadual do Rio Doce (PERD) e seu entorno na estação chuvosa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 830-857, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v28i0.73276

WANDERLEY, H. S.; JUSTINO, F. B.; SEDIYAMA, G. C. Temperature and Precipitation Trends on the Antarctic Peninsula. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 114-121, 2016. DOI:10.1590/0102-778631220140146

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.

WONG, M. L.; BATTISTI, D. S.; LIU, X.; DING, Q.; WANG, X. A North–South Dipole Response of the South Atlantic Convergence Zone During the Mid-Holocene. **Geophysical Research Letters**, v. 50, n. 23, p. e2023GL105130, 2023. DOI: 10.1029/2023GL105130

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269-2279, 2017. DOI: 10.1002/joc.4840

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M.; LINTNER, B. R. The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. **Climate Dynamics**, v. 52, p. 2245-2563, 2019. DOI: 10.1007/s00382-018-4277-1