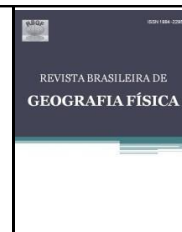




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Tendências Sazonais e Decadais no Posicionamento e Magnitude do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul para o Período de 1980-2018

Pedro Fioroti do Amaral¹, Fernanda Cerqueira Vasconcellos², Renan Martins Pizzochero³, Wanderson Luiz Silva⁴, Fabrício Polifke da Silva⁵, Renata Gonçalves Tedeschi⁶, Claudia Klose Parise⁷

¹ Estudante de Graduação do Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, CEP 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. fpedro1718@gmail.com. ² Dra. em Meteorologia, Professora do Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, CEP 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. fermandavasconcellos@igeo.ufrj.br. ³ Meteorologista em CPFL Energia, Rua Jorge Figueiredo Corrêa, 1632, Chácara Primavera, CEP 13087-490, Campinas, SP, Brasil. renan18martins@gmail.com. ⁴ Dr. em Meteorologia, Professor do Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, CEP 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. wanderson@igeo.ufrj.br. ⁵ Dr. em Meteorologia, Professor do Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, CEP 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. fabriciopolifke@igeo.ufrj.br. ⁶ Dra. em Meteorologia, Pesquisadora do Instituto Tecnológico Vale - Belém I, Rua Boaventura da Silva, 955, Nazaré, CEP 66055-090, Belém, PA, Brasil. rgtedeschi@gmail.com. ⁷ Dra. em Meteorologia, Professora do Departamento de Oceanografia e Limnologia, Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Avenida dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga, CEP 65080-805, São Luís, MA, Brasil. claudia.parise@ufma.br.

Submetido em 10/09/2024 e aceite em 24/06/2024

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. Palavras-chave: ASAS, tendência climática, Mann-Kendall, Curvatura de Sen.

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.

Keywords: SASH, climate trend, Mann-Kendall, Sen's Slope.

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 se enfraquece 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, conseqüentemente, 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.

Material e metodologia

Foram utilizadas as saídas mensais das reanálises do ERA-Interim (ERA-I) 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-I 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° x 0,25° 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-Kendall 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* ≠ *j*; sendo *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:

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

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:

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & s > 0; \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

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:

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

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 $C_\alpha = z_{1-\alpha/2} \sqrt{Var[s]}$, onde $Var[s]$ 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 na Figura 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.

Resultados e discussão

A Figura 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 poderiam 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), sendo mais expressivo no inverno (Figura 2 c). Na Tabela 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 3 mostra que em ambas as reanálises, e em todas as estações, houve a tendência de deslocamento para sul. Na Tabela 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 (ERAI) 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 4), tornando-se mais próximas da América do Sul. Houve diferenças entre as reanálises com relação às tendências (Tabela 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 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 5). Porém, a Tabela 4 mostra que o verão (ERA1 e ERA5) e o inverno (ERA1) austrais não apresentaram tendência pela Curvatura de Sen. Para ERA1 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 ERA1 (Tabela 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 tornem 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).

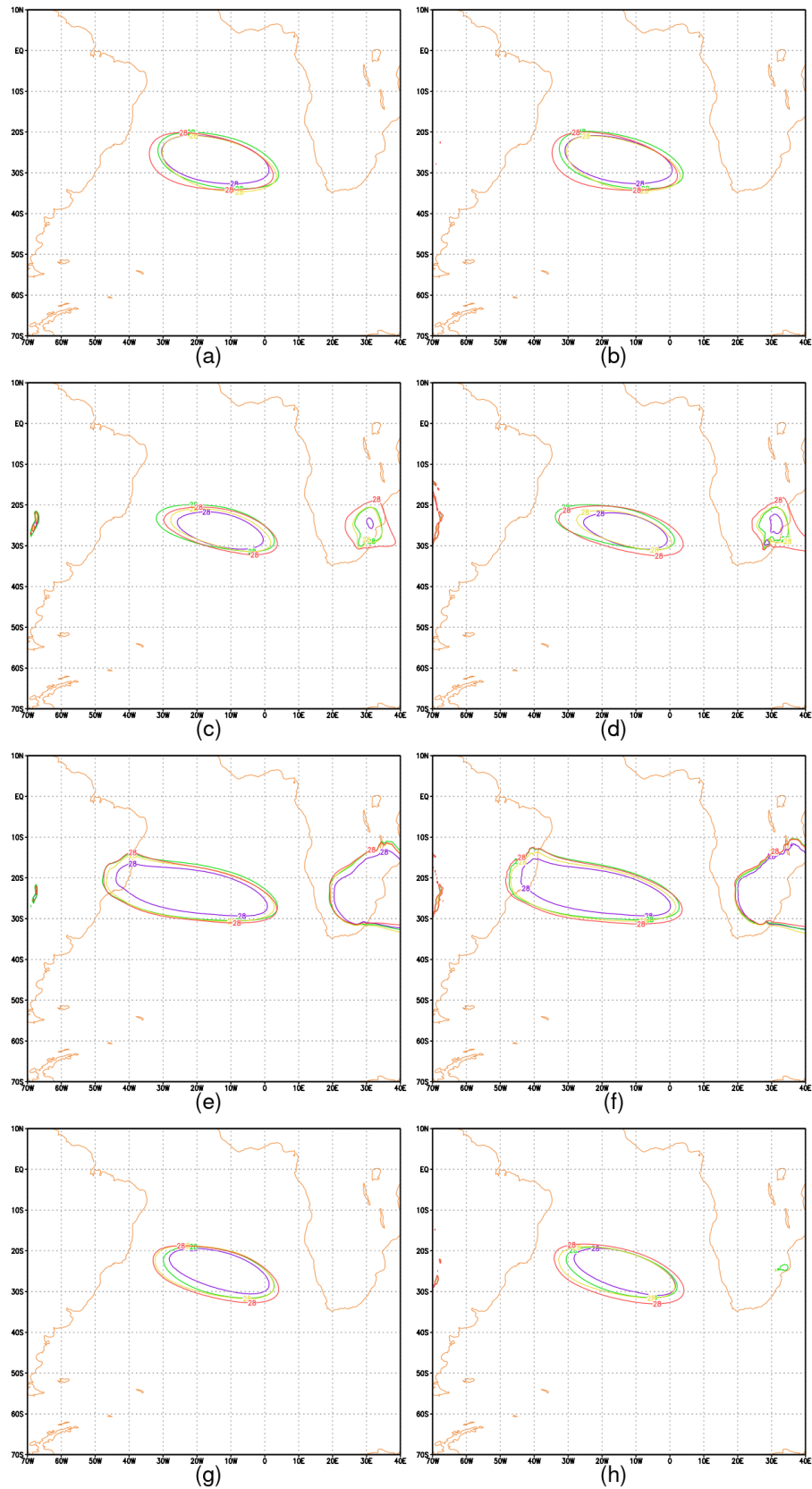


Figura 1. Contornos de anomalia de geopotencial (isolinha de 28 gpm) para representar a extensão espacial do ASAS. Roxo: média de 1980-1989, Verde: média de 1990-1999, Amarelo: média de 2000-2009 e Vermelho: média de 2010-2018. Verão austral (DJF) para ERAI (a) e ERA5 (b), outono austral (MAM) para ERAI (c) e ERA5 (d), inverno austral (JJA) para ERAI (e) e ERA5 (f), primavera austral (SON) para ERAI (g) e ERA5 (h).

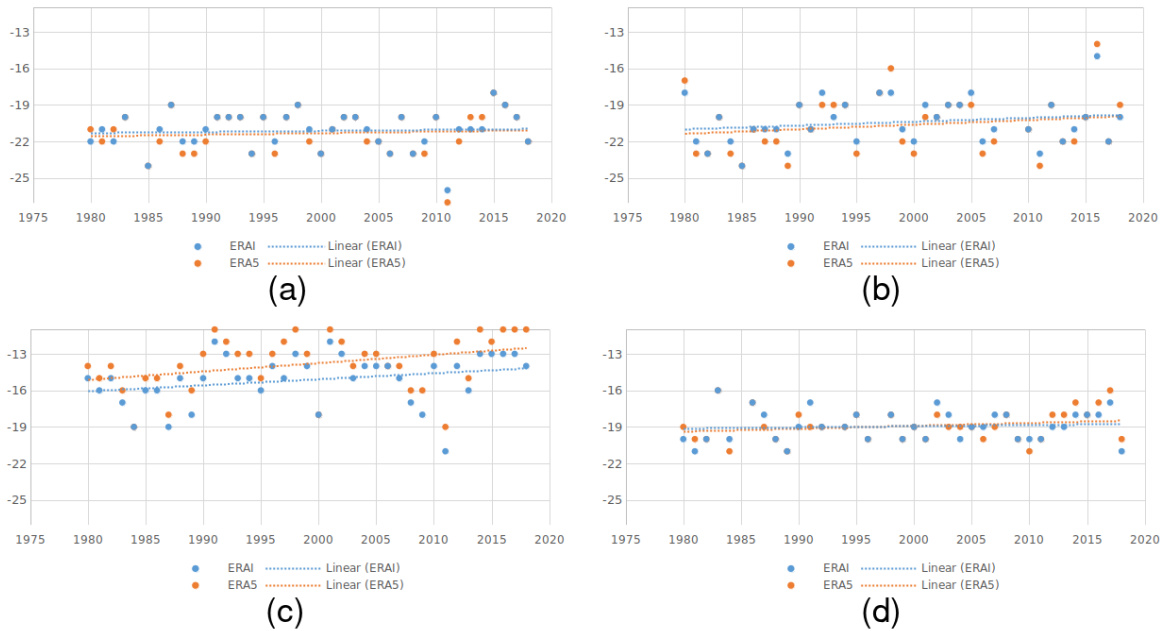


Figura 2. Gráfico de tempo *versus* latitude do limite norte do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude do limite norte do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 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.

ERA1 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

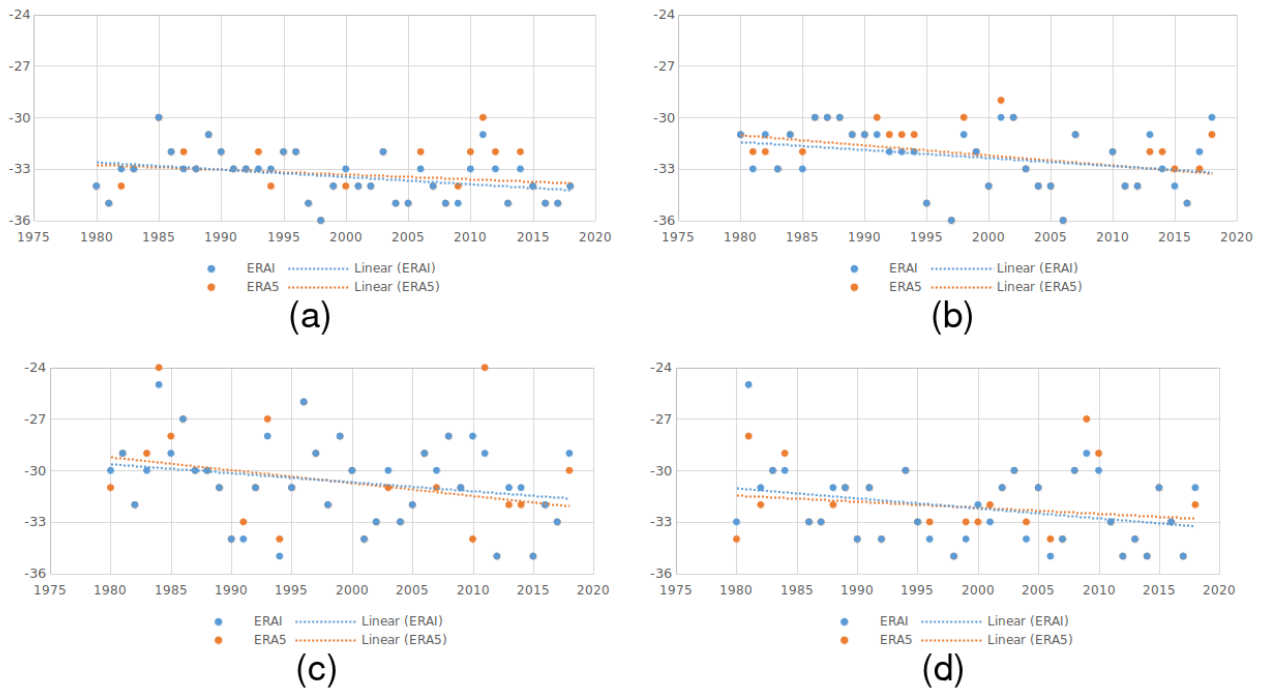


Figura 3. Gráfico de tempo *versus* latitude do limite sul do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude do limite sul do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 2. 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.

ERAISUL	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

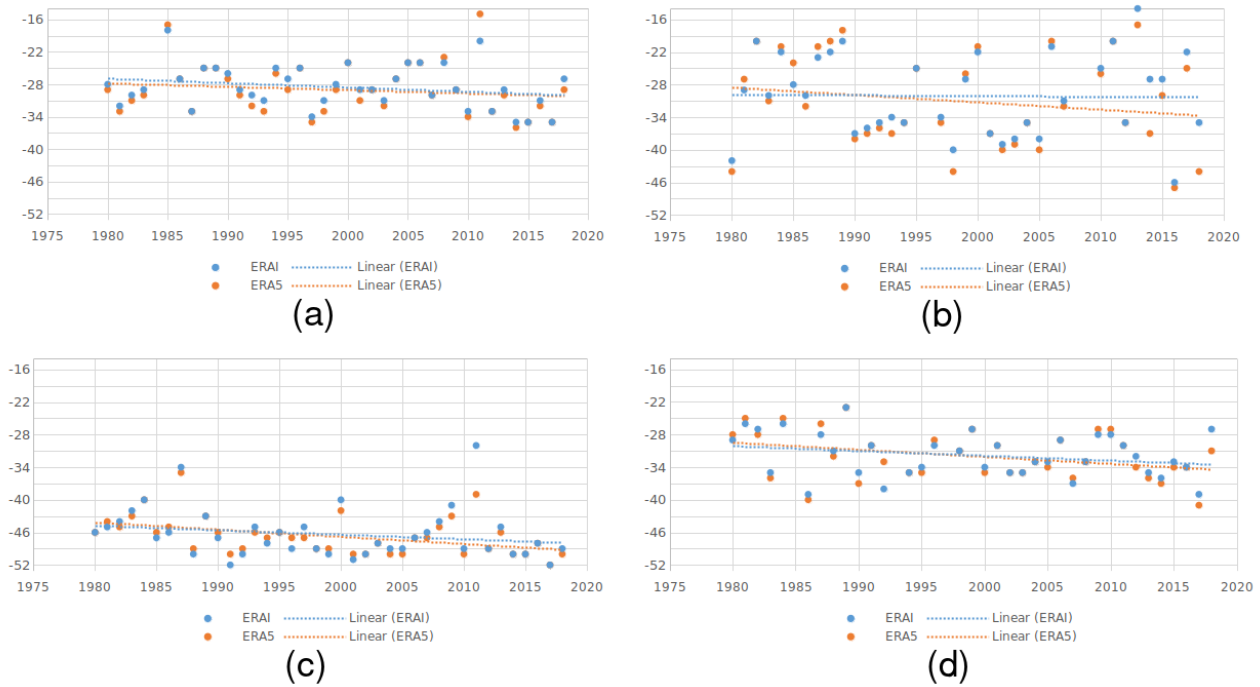


Figura 4. Gráfico de tempo *versus* longitude do limite oeste do ASAS para o período de 1980-2018:verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a longitude do limite oeste do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

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



Figura 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.

Tabela 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.

ERA1 LESTE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,000
MAM	SIM	0,170
JJA	NÃO	0,000
SON	SIM	0,113
ERA5 LESTE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE 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 6 e Tabela 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 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 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 em partes 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, conseqüentemente, 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 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 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 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 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.

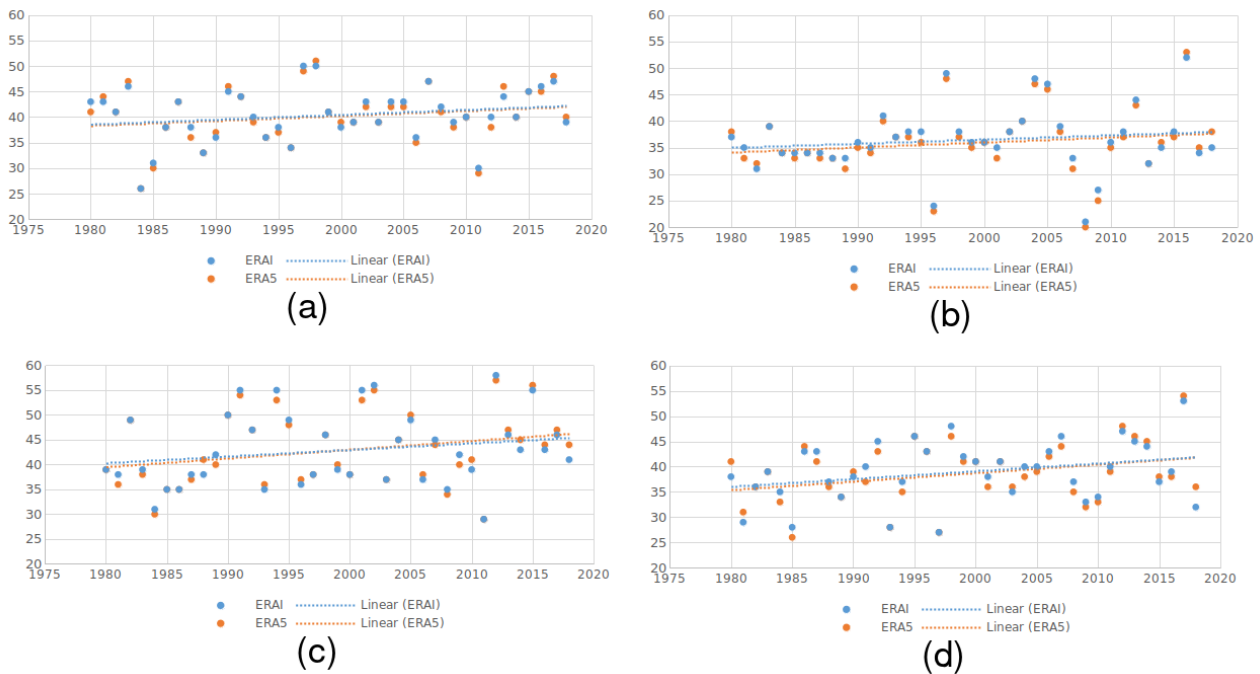


Figura 6. Variação da intensidade (em gpm) do centro do ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) da intensidade do centro do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 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.

ERAI INTENSIDADE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,087
MAM	NÃO	0,059
JJA	NÃO	0,129
SON	NÃO	0,143
ERA5 INTENSIDADE	MANN-KENDALL	CURVATURA DE SEN
DJF	NÃO	0,095
MAM	NÃO	0,100
JJA	SIM	0,207
SON	NÃO	0,143

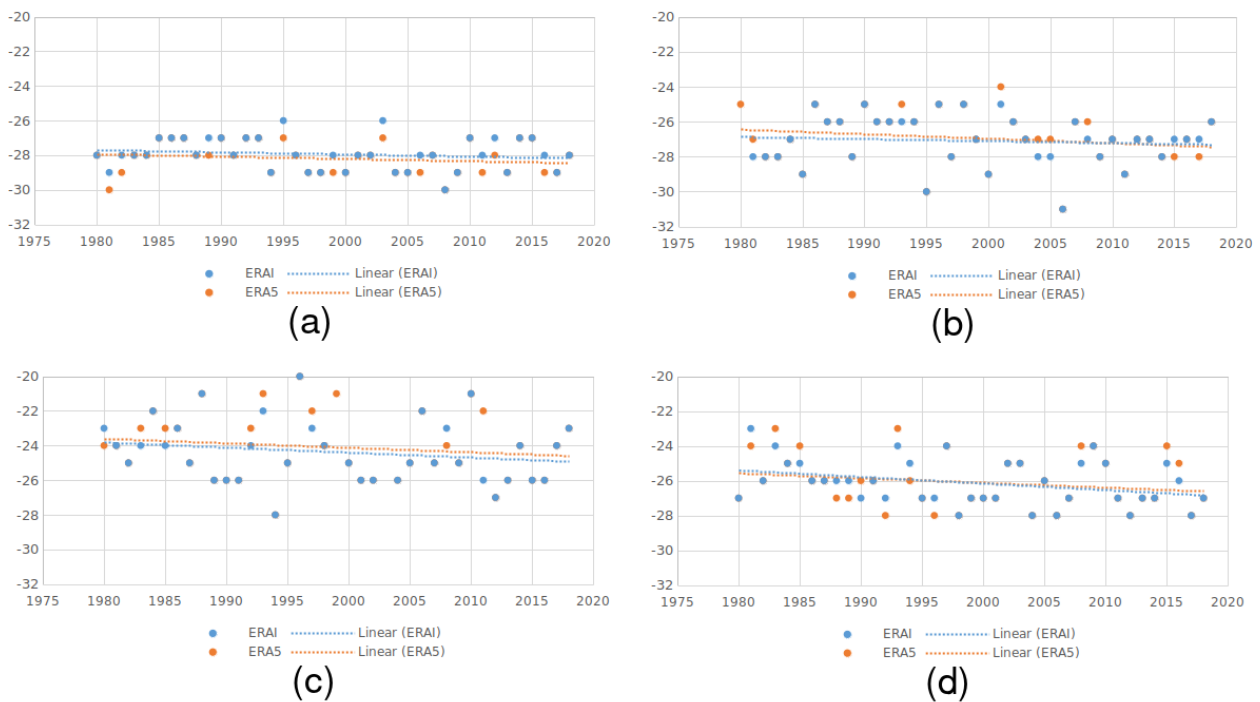


Figura 7. Variação meridional do centro da ASAS para o período de 1980-2018: verão (DJF) (a), outono (MAM) (b), inverno (JJA) (c), primavera (SON) (d) austral. Os pontos em azul (laranja) representam os resultados do ERAI (ERA5) para a latitude do centro do ASAS. As linhas mostram tendências lineares.

Tabela 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.

ERAI 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

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, mudanças na Célula de Hadley devido ao aquecimento global 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.

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.

Referências

- Amorim, A., Silva, C., & Chaves, R. (2014). 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.
- Bombardi, R. J., & Carvalho, L. M. V. D. (2017). Simple Practices in Climatological Analyses: A Review. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 311-320. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230001>
- Carpenedo, C. B., & Ambrizzi, T. (2020). Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 605-613. <https://doi.org/10.1590/0102-77863540066>
- Carpenedo, C. B., Ambrizzi, T., & Silva, R. C. (2022). 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*, 94, e20211623. <https://doi.org/10.1590/0001-376520220211623>
- 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. (2016). The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*, 46, 3737-3752. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>
- Córdova, M., Célleri, R., & van Delden, A. (2022). Dynamics of precipitation anomalies in tropical south America. *Atmosphere*, 13(6), 972. <https://doi.org/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. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*

- Society, 137, 553–597.
<https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Fahad, A. A., & Burls, N. J. (2022). The influence of direct radiative forcing versus indirect sea surface temperature warming on southern hemisphere subtropical anticyclones under global warming. *Climate Dynamics*, 58(9), 2333-2350. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06006-1>
- Fahad, A. A., N. J. Burls, E. T. Swenson, & Straus, D. M. (2021). The Influence of South Pacific Convergence Zone Heating on the South Pacific Subtropical Anticyclone. *Journal of Climate*, 34, 3787–3798. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0509.1>
- Gilliland, J. M., & Keim, B. D. (2018). Position of the South Atlantic Anticyclone and its impact on surface conditions across Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(3), 535-553. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0178.1>
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and planetary change*, 100, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- de Moura Joia Gomes, L., & Freitas, A. C. V. (2020). Alterações na Circulação de Hadley Regional e na Alta Subtropical do Atlântico Sul em um Cenário de Aquecimento Global. *Anuario do Instituto de Geociências*, 43(3). https://doi.org/10.11137/2020_3_227_239
- Gozzo, L. F., Palma, D. S., de Souza Custódio, M., & Drumond, A. (2021). Padrões climatológicos associados a eventos de seca no Leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 321-341. <http://dx.doi.org/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. (2022). Intraseasonal drivers of the 2018 drought over São Paulo, Brazil. *Frontiers in Climate*, 4, 852824. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.852824>
- He, C., Wu, B., Zou, L., & Zhou, T. (2017). Responses of the summertime subtropical anticyclones to global warming. *Journal of Climate*, 30(16), 6465-6479. <https://doi.org/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., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/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. (2023). Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. *Scientific Reports*, 13(1), 11236. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38174-x>
- Hu, X., Eichner, J., Gong, D., Barreiro, M., & Kantz, H. (2023). Combined impact of ENSO and Antarctic Oscillation on austral spring precipitation in Southeastern South America (SESA). *Climate Dynamics*, 61(1), 399-412. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06592-8>
- IPCC (2021). *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., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
- Kendall, M. G., (1975). *Rank Correlation Methods*, 4 ed., Charles Griffin, London.
- Liu, Y., Wu, G., & Ren, R. (2004). Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. *Journal of Climate*, 17(4), 682-698. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0682:RBTSAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0682:RBTSAA>2.0.CO;2)
- Luiz-Silva, W., da Silva, F. P., Dereczynski, C. P., & de Almeida França, J. R. (2023). 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*, 11(8), 131-160. [10.4236/gep.2023.118008](https://doi.org/10.4236/gep.2023.118008)

- Luiz-Silva, W., & Oscar-Júnior, A. C. (2022). Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. *Natural Hazards*, 114(1), 713-732. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>
- Jain, S. K., & Kumar, V. (2012). Trend analysis of rainfall and temperature data for India. *Current Science*, 37-49.
- Mächel, H., Kapala, A., & Flohn, H. (1998). Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. *International Journal of Climatology*, 18(1), 1-22. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199801\)18:1<1::AID-JOC225>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199801)18:1<1::AID-JOC225>3.0.CO;2-A)
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Parise, C. K., Pezzi, L. P., Carpenedo, C. B., Vasconcellos, F. C., Barbosa, W. L., & Lima, L. G. D. (2022). Sensitivity of South America climate to positive extremes of Antarctic sea ice. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(suppl 1), e20210706. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210706>
- Penna, A. C., Torres, R. R., Garcia, S. R., & Marengo, J. A. (2021). Moisture flows on Southeast Brazil: Present and future climate. *International Journal of Climatology*, 41, E935-E951. [10.1002/joc.6738](https://doi.org/10.1002/joc.6738)
- Pérez-Alarcón, A., Coll-Hidalgo, P., Fernández-Alvarez, J. C., Sorí, R., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Nieto, R. & Gimeno, L. (2024). 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*. <https://doi.org/10.1002/qj.4734>
- Pérez-Alarcón, A., Coll-Hidalgo, P., Fernández-Alvarez, J. C., Trigo, R. M., Nieto, R., & Gimeno, L. (2023). 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*, 149(752), 1038-1055. <https://doi.org/10.1002/qj.4452>
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Silva, B. A., Pinheiro, R. F., & Da Rocha, R. P. (2019). The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. *Frontiers in Earth Science*, 7, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. D., & Ambrizzi, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 185-204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Reboita, M. S., Oliveira, D. D., Freitas, C. D., Oliveira, G. D., & Pereira, R. D. A. (2015). Anomalias dos Padrões Sinóticos da Atmosfera na América do Sul nos Meses de Janeiros de 2014 e 2015. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 4(4).
- Reboita, M. S., Rodrigues, M., Armando, R., Freitas, C., Martins, D., & Miller, G. (2016). The causes of semi-aridity in the Northeast “Sertão”. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19. <https://doi.org/10.5380/abclima.v19i0.42091>
- Reboita, M. S., Teodoro, T. A., Ferreira, G. W. S., & Souza, C. A. (2022). Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: Clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(01), 343-358. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p343-358>
- Regoto, P. P., Dereczynski, C., Silva, W. L., Santos, R., & Confalonieri, U. (2018). Tendências de extremos de precipitação para o estado do Espírito Santo. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(1), 365-381. http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_365_381
- Regoto, P., Dereczynski, C., Chou, S. C., & Bazzanella, A. C. (2021). Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5125-5142. <https://doi.org/10.1002/joc.7119>
- Rodrigues, R. R., Haarsma, R. J., Campos, E. J., & Ambrizzi, T. (2011). The impacts of inter-El Niño variability on the tropical Atlantic and northeast Brazil climate. *Journal of Climate*, 24(13), 3402-3422. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3983.1>
- Rodwell, M. J., & Hoskins, B. J. (2001). Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14(15), 3192-3211. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3192:SAASM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3192:SAASM>2.0.CO;2)
- Santos, T. C. D., Reboita, M. S., & Carvalho, V. S. B. (2018). Investigação da Relação entre Variáveis Atmosféricas e a Concentração de MP 10 E O 3 no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 631-645. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334006>
- Seager, R., Murtugudde, R., Naik, N., Clement, A., Gordon, N., & Miller, J. (2003). Air-sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. *Journal of Climate*, 16(12), 1948-1966.

- [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<1948:AIATSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1948:AIATSC>2.0.CO;2)
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. [10.1080/01621459.1968.10480934](https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934)
- Sun, X., Cook, K. H., & Vizi, E. K. (2017). The South Atlantic subtropical high: Climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, 30(9), 3279-3296. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0705.1>
- Vallis, G. K., Zurita-Gotor, P., Cairns, C., & Kidston, J. (2015). Response of the large-scale structure of the atmosphere to global warming. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(690), 1479-1501. <https://doi.org/10.1002/qj.2456>
- Vieira, C. A., & Cupolilo, F. (2021). 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*, 28, 830-857. <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14949>
- Wanderley, H. S., Justino, F. B., & Sedyama, G. C. (2016). Tendência da Temperatura e Precipitação na Península Antártica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31, 114-121. <https://doi.org/10.1590/0102-778631220140146>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Vol. 100, Academic Press, San Diego, CA.
- Wong, M. L., Battisti, D. S., Liu, X., Ding, Q., & Wang, X. (2023). A North–South Dipole Response of the South Atlantic Convergence Zone During the Mid-Holocene. *Geophysical Research Letters*, 50(23), e2023GL105130. <https://doi.org/10.1029/2023GL105130>
- Zilli, M. T., Carvalho, L. M., Liebmann, B., & Silva Dias, M. A. (2017). A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2269-2279. <https://doi.org/10.1002/joc.4840>