Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA ASSOCIADA AOS PADRÕES ESPACIAIS DOMINANTES DAS SECAS METEOROLÓGICAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Atmospheric Circulation Associated with the Dominant Spatial Patterns of Meteorological Droughts in Southern Brazil

Circulación Atmosférica Asociada a los Patrones Espaciales Dominantes de las Sequías Meteorológicas en la Región Sur de Brasil

Cecilia Kawata Barbosa
Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas (NUVEM)
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
ceciliakawata@gmail.com

Cláudia Klose Parise
Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA)
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
claudia.parise@ufma.br

Fernanda Cerqueira Vasconcellos
Departamento de Meteorologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
fernandavasconcellos@igeo.ufrj.br

Camila Bertoletti Carpenedo
Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas (NUVEM)
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
camila.carpenedo@ufpr.br

Resumo: A seca é caracterizada como um período excepcional de escassez hídrica para os seres humanos e ecossistemas. No Brasil, a Região Sul é a segunda com maior ocorrência de estiagens/secas. Assim, o objetivo deste estudo é investigar quais padrões de circulação atmosférica estão associados aos eventos de seca meteorológica na Região Sul, nos meses de janeiro de 1950-2025. Para isso, utilizamos o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI-01; *Global Drought Monitor*), campos atmosféricos (ERA5/ECMWF) e o Índice de Niño Oceânico Relativo (RONI; CPC/NOAA). Foram calculadas Funções Ortogonais Empíricas (EOF) e composições atmosféricas. Os resultados mostram que a EOF1 do SPEI-01 corresponde a eventos secos ou úmidos abrangendo toda a Região Sul (35,5% da variância). Os escores positivos extremos da EOF1, associados às secas nesta região, indicam um dipolo úmido-seco entre as Regiões Norte/Sudeste e a Região Sul, semelhante ao padrão de Zona de Convergência do Atlântico Sul fortalecida. Essa configuração foi associada ao enfraquecimento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do jato de baixos níveis da América do Sul (JBNAS). Por outro lado, a EOF2 revelou um dipolo úmido-seco entre o Rio Grande do Sul e o Paraná/Santa Catarina (23,2% da variância). Este dipolo está associado a anomalias de temperatura da superfície do mar semelhantes a eventos de El Niño e à fase positiva do Dipolo do Atlântico Sul, além de fortalecimento do ramo oeste da ASAS, que intensifica o JBNAS e favorece déficit de precipitação entre Paraná e São Paulo. Houve predominância de condições de El Niño (7 de 13 casos), consistente com as anomalias positivas de temperatura da superfície do mar observadas no Pacífico equatorial. Os resultados reforçam a importância do monitoramento climático para aprimorar estratégias de adaptação, prevenção e mitigação dos impactos das secas.
Palavras-chave: Variabilidade climática. Índice SPEI. Teleconexões atmosféricas.

Abstract: Drought is characterized as an exceptional period of water scarcity affecting both human societies and ecosystems. In Brazil, the Southern Region has the second-highest occurrence of drought and dry spells. Thus, the objective of this study is to investigate which atmospheric circulation patterns are associated with meteorological drought events in Southern Brazil in January during the 1950-2025 period. For this purpose, we used the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI-01; Global Drought Monitor), atmospheric fields (ERA5/ECMWF), and the Relative Oceanic Niño Index (RONI; CPC/NOAA). Empirical Orthogonal Functions (EOF) and atmospheric composite analyses were computed. The results show that EOF1 of SPEI-01 corresponds to dry or wet events affecting the entire Southern Region (35.5% of the variance). Extreme positive scores of EOF1, associated with droughts in this region, indicate a wet-dry dipole between the North/Southeast regions and the Southern Region, resembling a strengthened South Atlantic Convergence Zone pattern. This configuration is associated with the weakening of the South Atlantic Subtropical High (SASH) and the South American Low-Level Jet (SALLJ). On the other hand, EOF2 reveals a wet-dry dipole between Rio Grande do Sul and Paraná/Santa Catarina (23.2% of the variance). This dipole is associated with sea surface temperature anomalies similar to El Niño events and the positive phase of the South Atlantic Dipole, as well as a strengthening of the western branch of the SASH, which intensifies the SALLJ and favors precipitation deficits between Paraná and São Paulo. There was a predominance of El Niño conditions (7 out of 13 cases), consistent with the positive sea surface temperature anomalies observed in the equatorial Pacific. These results highlight the importance of climate monitoring to improve strategies for adaptation, prevention, and mitigation of drought impacts.
Keywords: Climate variability. SPEI index. Atmospheric teleconnections.

Resumen: La sequía se caracteriza como un período excepcional de escasez hídrica que afecta a las sociedades humanas y a los ecosistemas. En Brasil, la Región Sur presenta la segunda mayor ocurrencia de sequías y periodos secos. Así, el objetivo de este estudio es investigar qué patrones de circulación atmosférica están asociados con los eventos de sequía meteorológica en la Región Sur de Brasil en los meses de enero del período 1950-2025. Para ello, utilizamos el Índice Estandarizado de Precipitación-

Evapotranspiración (SPEI-01; Global Drought Monitor), campos atmosféricos (ERA5/ECMWF) y el Índice Oceánico de El Niño Relativo (RONI; CPC/NOAA). Se calcularon Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) y composiciones atmosféricas. Los resultados muestran que la EOF1 del SPEI-01 corresponde a eventos secos o húmedos que abarcan toda la Región Sur (35,5 % de la varianza). Los puntajes positivos extremos de la EOF1, asociados a sequías en esta región, indican un dipolo húmedo-seco entre las regiones Norte/Sudeste y la Región Sur, similar al patrón de una Zona de Convergencia del Atlántico Sur intensificada. Esta configuración se asocia con el debilitamiento de la Alta Subtropical del Atlántico Sur (ASAS) y del chorro de bajos niveles de América del Sur (JBNAS). Por otro lado, la EOF2 revela un dipolo húmedo-seco entre Rio Grande do Sul y Paraná/Santa Catarina (23,2 % de la varianza). Este dipolo se asocia con anomalías de temperatura de la superficie del mar similares a eventos de El Niño y con la fase positiva del Dipolo del Atlántico Sur, además del fortalecimiento de la rama occidental de la ASAS, lo que intensifica el JBNAS y favorece déficits de precipitación entre Paraná y São Paulo. Hubo un predominio de condiciones de El Niño (7 de 13 casos), consistente con las anomalías positivas de la temperatura superficial del mar observadas en el Pacífico ecuatorial. Los resultados refuerzan la importancia del monitoreo climático para mejorar las estrategias de adaptación, prevención y mitigación de los impactos de las sequías.

Palabras clave: Variabilidad climática. Índice SPEI. Teleconexiones atmosféricas.

Submetido em: 16/03/2026
Aceito para publicação em: 05/09/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a manutenção da vida e a organização socioeconômica, sendo responsável pelo abastecimento público, atividades agrícolas e industriais, geração de energia hidroelétrica, etc. Nesse contexto, a importância estratégica da água no Brasil assume papel de destaque, graças a sua condição privilegiada, ao possuir cerca de 12% de toda a água doce disponível no planeta. Entretanto, mesmo com tal disponibilidade, a distribuição hídrica regional é desigual, sobretudo devido às irregularidades pluviométricas (Castro, 2022).

A seca é definida como um período excepcional com escassez hídrica para os seres humanos e ecossistemas, devido à baixa pluviosidade, alta temperatura e/ou vento (IPCC, 2022). As secas são fenômenos climáticos resultantes da interação entre diversos fatores como, por exemplo, a circulação atmosférica, os sistemas atmosféricos e a variabilidade climática (Marengo *et al.*, 2016). Embora as secas possam ocorrer em resposta à variabilidade natural do sistema climático, as mudanças climáticas antropogênicas podem modificar sua frequência, duração e intensidade, por meio de alterações nos padrões de precipitação e do aumento da demanda evaporativa da atmosfera (Seneviratne *et al.*, 2021).

Recentemente, a seca na bacia do Prata, entre 2019 e 2021, foi uma das cinco mais intensas no sudeste da América do Sul desde a década de 1950 (Naumann *et al.*, 2022). Este evento impactou negativamente a geração hidrelétrica e o abastecimento de água, além de favorecer o aumento do número de focos de queimada (Getirana *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2021; Naumann *et al.*, 2022).

Entre 1995 e 2019, o Brasil registrou R$ 199,83 bilhões em danos materiais e prejuízos associados às estiagens e secas, sendo o setor agropecuário o mais afetado, totalizando R$ 167 bilhões em prejuízos (Banco Mundial, 2020). A Região Sul do país é a segunda com maior ocorrência de estiagens e secas meteorológicas, totalizando R$ 39,5 bilhões em danos materiais e prejuízos (Banco Mundial, 2020).

Nesse contexto, compreender os mecanismos atmosféricos responsáveis pela ocorrência e organização espacial das secas meteorológicas na Região Sul do Brasil torna-se fundamental para aprimorar o monitoramento e a previsão desses eventos, bem como para subsidiar estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. Assim, este

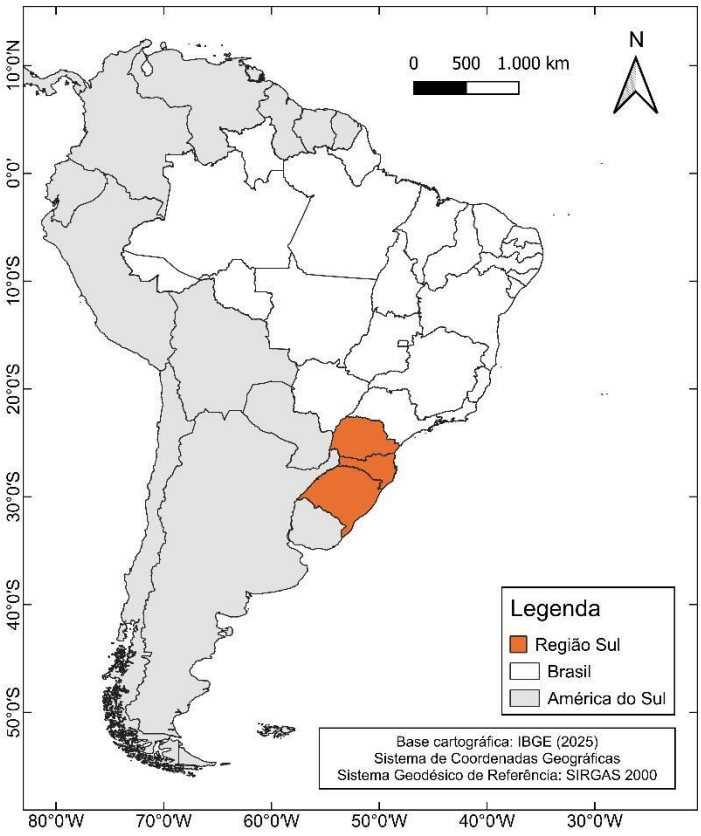
estudo tem como objetivo investigar quais padrões de circulação atmosférica estão associados aos eventos de seca meteorológica na Região Sul do Brasil, entre 1950 e 2025.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a Região Sul do Brasil, a qual é composta pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, conforme ilustrado na Figura 1. Essa área está localizada entre as latitudes 22°30’ S e 33° 45’ S e as longitudes 57° 59’ W e 48° 00’ W (Wrege *et al.*, 2012).

Figura 1 – Localização da Região Sul do Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O estado do Paraná possui uma população estimada de 11.444.380 habitantes (IBGE, 2022a) e uma área territorial de ~199,3 mil km² (IBGE, 2024a). Já Santa Catarina apresenta uma população de 7.610.361 pessoas (IBGE, 2022b) e uma extensão territorial de 95,7 mil km² (IBGE, 2024b). Por fim, o Rio Grande do Sul conta com 10.882.965 habitantes (IBGE, 2022c) distribuídos em 281,7 mil km² (IBGE, 2024c).

Em conjunto, os três estados da Região Sul do Brasil respondem por cerca de 20% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (Fernandes *et al.*, 2021), evidenciando a elevada relevância econômica da região no contexto brasileiro. Destacam-se, nesse cenário, os setores agrícola e energético, ambos altamente sensíveis à variabilidade climática. A região configura-se como um dos principais polos de produção agrícola do país, com participação expressiva na produção nacional de grãos, especialmente soja, milho e trigo, desempenhando papel estratégico no abastecimento interno e nas exportações brasileiras. Paralelamente, o sistema energético regional apresenta forte dependência da geração hidrelétrica, cuja produção está diretamente associada à disponibilidade hídrica nas principais bacias hidrográficas que drenam a região e que contribuem significativamente para o Sistema Interligado Nacional.

2.2. Dados

Para identificar os eventos de seca, utilizamos o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index - SPEI), obtido do SPEI Global Drought Monitor (https://spei.csic.es/map/maps.html), com espaçamento horizontal de 1° de latitude x 1° de longitude (Beguería *et al.*, 2014). O índice SPEI-01, calculado na escala temporal de acumulação de 1 mês, foi utilizado para identificar as secas meteorológicas na Região Sul do Brasil, entre 1950 e 2025. O SPEI Global Drought Monitor baseia-se em dados de precipitação do Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) e em dados de temperatura do ar provenientes da combinação das bases Global Historical Climatology Network version 2 e Climate Anomaly Monitoring System (GHCN + CAMS), mantidas pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Para o cálculo do índice SPEI, primeiramente é necessário estimar a evapotranspiração potencial (ETP), a qual é obtida a partir do método de Thornthwaite (1948), que apresenta uma abordagem simplificada ao considerar a temperatura média mensal como variável principal (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Para avaliar os campos atmosféricos associados aos eventos de seca meteorológica, foi utilizada a reanálise climática ERA5, produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com espaçamento horizontal de 0,25° de latitude x 0,25° de longitude (Hersbach *et al.*, 2020). Neste estudo, foram utilizadas as

seguintes variáveis, para o período de 1950 a 2025: pressão ao nível médio do mar (PNMM; hPa), temperatura da superfície do mar (TSM; °C), temperatura do ar a 2 m (°C), vetor vento e magnitude em 850 hPa (m s^{-1}), altura geopotencial em 500 hPa (m), vento zonal em 200 hPa (m s^{-1}) e divergência do fluxo de umidade integrado na vertical (10^{-4} kg m^{-2} s^{-1}). A divergência do fluxo de umidade integrado na vertical do ERA5 representa a integração ao longo de toda a coluna atmosférica, desde a superfície até o topo do modelo, localizado em 0,01 hPa (Hersbach; Dee, 2016).

Para avaliar a atuação das fases fria e quente do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) associadas aos eventos de seca meteorológica na Região Sul do Brasil, utilizamos o *Relative Oceanic Niño Index* (RONI), do *Climate Prediction Center* (CPC) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). O RONI é calculado a partir da média móvel trimestral das anomalias de TSM na região Niño 3.4 (5°N-5°S; 120°-170°W), obtidas do conjunto ERSSTv6, das quais é subtraída a anomalia média de TSM da faixa tropical global (20°N-20°S). Posteriormente, a diferença é ajustada de modo que sua variância corresponda à do índice Niño 3.4 original. Esse procedimento reduz a influência do aquecimento médio dos oceanos tropicais sobre as anomalias do Pacífico equatorial, permitindo caracterizar o ENOS em relação ao estado térmico médio dos trópicos. Foram considerados eventos quentes (El Niño) os períodos em que o RONI apresentou índices iguais ou superiores a +0,5°C e eventos frios (La Niña) aqueles com valores iguais ou inferiores a -0,5°C, mantidos por pelo menos cinco trimestres consecutivos.

2.3. Métodos

Neste estudo, as análises foram realizadas apenas para os meses de janeiro ao longo de toda a série temporal de 1950 a 2025. Definiu-se janeiro como mês de análise por corresponder ao verão austral, período caracterizado por elevados acumulados de precipitação em grande parte da Região Sul, especialmente no Paraná e em Santa Catarina, embora o regime pluviométrico regional apresente importante variabilidade espacial e menor sazonalidade em direção ao Rio Grande do Sul (Liebmann *et al.*, 2004; Back; Sônego; Pereira, 2020; Ferreira; Reboita, 2022).

Para identificar e avaliar os padrões espaciais dominantes dos eventos de seca

meteorológica na Região Sul, inicialmente foram calculadas as Funções Ortogonais Empíricas (*Empirical Orthogonal Functions* - EOF) do índice SPEI-01 sem tendência, somente para o mês de análise, que foi janeiro (1950-2025), no domínio da Região Sul (latitudes entre 34° e 22°S e longitudes entre 58° e 49°W). A partir da análise de EOF, é possível reduzir um grande conjunto de dados para um conjunto menor e composto por novas variáveis, obtidas por meio de combinações lineares das variáveis originais. Essas combinações são definidas de modo a representar a maior fração possível da variabilidade contida nos dados iniciais, refletida em padrões espaciais cujas componentes principais variam no tempo. Uma descrição detalhada do cálculo de EOF pode ser encontrada em Wilks (2006). Adicionalmente, utilizamos o método de North *et al.* (1982) para estimar o erro amostral dos autovalores e avaliar sua separação estatística (Equação 1).

$$\Delta\lambda \approx \lambda\sqrt{\frac{2}{n}} \quad (1)$$

onde λ é o autovalor (variância explicada) e n é o número de amostras. A Equação 1 relaciona o erro amostral associado a um autovalor à diferença entre autovalores adjacentes, indicando que, quando esse erro é comparável ou maior do que a separação entre dois autovalores, eles não podem ser considerados distintos. Assim, apenas autovalores suficientemente separados, isto é, aqueles cujos intervalos de erro amostral $\lambda \pm \Delta\lambda$ não se sobrepõem, podem ser interpretados individualmente, visto que sua diferença excede o erro amostral estimado.

Foram calculadas composições (Storch; Zwiers, 1999) do índice SPEI-01 e dos campos atmosféricos em relação à climatologia 1991-2020, considerando os meses em que os escores das EOF do índice SPEI-01 apresentaram valores extremos. Para a seleção dos extremos, foram considerados os escores negativos (positivos) com valores ≤ -1 (≥ +1) desvio padrão. A significância estatística foi obtida através do teste t de *Student*, ao nível de significância de 10% (Wilks, 2006).

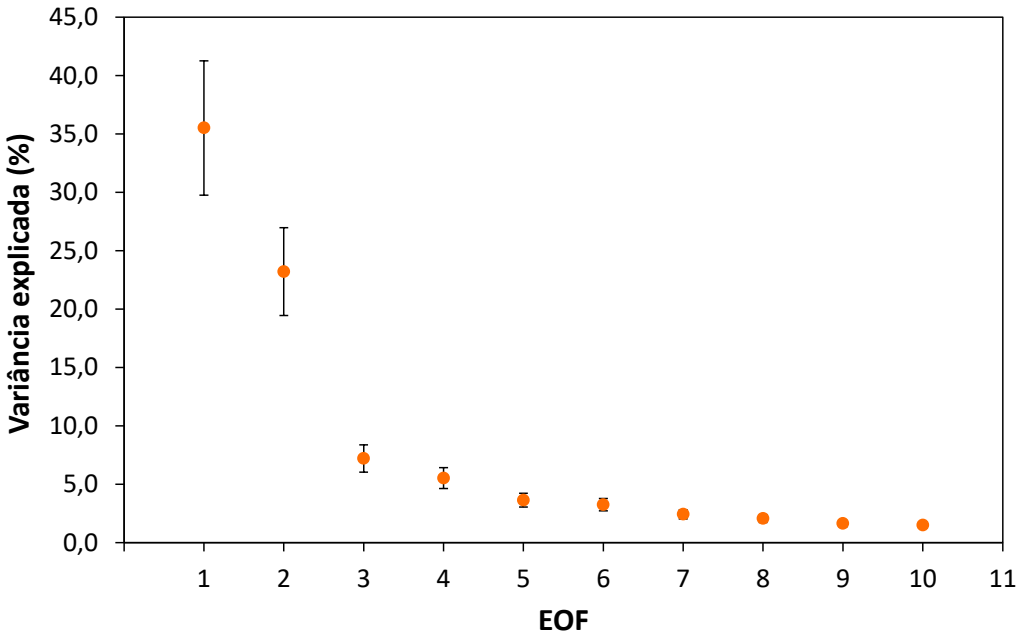
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Padrões espaciais do índice SPEI-01 na Região Sul

A Figura 2 apresenta a variância explicada pelos modos das EOF do índice SPEI-01 para a Região Sul, considerando o mês de janeiro ao longo de 76 anos (1950-2025). Os

intervalos de erro estimados com base no critério de separação de autovalores de North *et al.* (1982) indicam que os dois primeiros modos apresentam separação estatística bem definida, particularmente entre a EOF1 e a EOF2, as quais explicam 35,5 ± 5,8% e 23,2 ± 3,8% da variância total, respectivamente. A partir da EOF3, observa-se uma sobreposição entre os intervalos de erro amostral, o que sugere menor distinção estatística entre esses modos e, consequentemente, menor robustez física na representação dos padrões de variabilidade. Dessa forma, apenas as duas primeiras EOF do índice SPEI-01 são analisadas neste estudo.

Figura 2 – Variância explicada das EOF do índice SPEI-01 na Região Sul do Brasil para janeiro de 1950 a 2025 (pontos laranja). As barras verticais representam o erro amostral dos autovalores, estimado pelo critério de North *et al.* (1982).

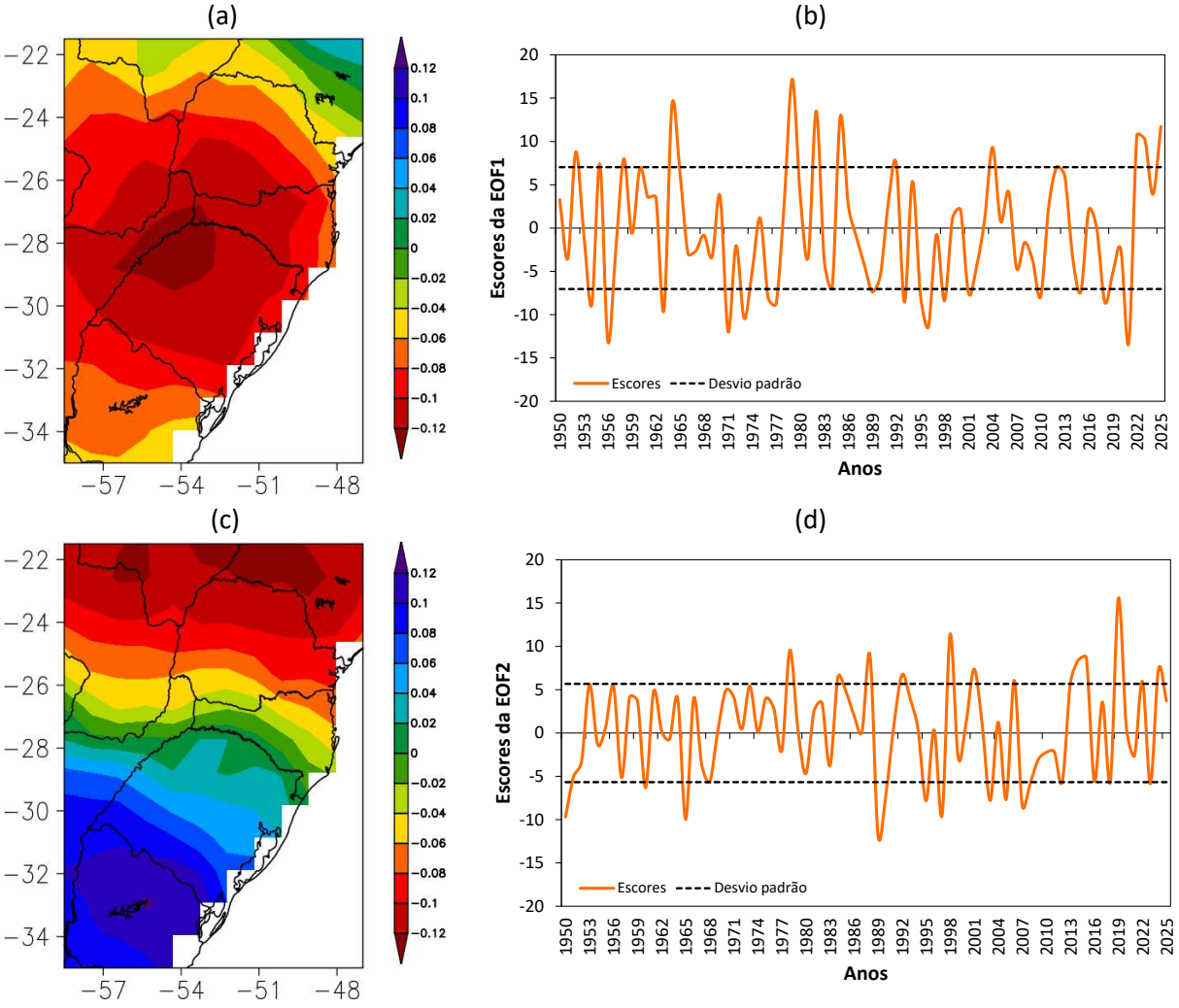


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 3 apresenta os padrões espaciais das EOF1 e EOF2 do índice SPEI-01 para a Região Sul do Brasil, bem como as respectivas séries temporais dos escores. A EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 3a) revela que o principal modo de variabilidade deste índice está associado à ocorrência de eventos de seca (valores positivos dos escores da EOF1, correspondentes a SPEI-01 negativo) ou de condições úmidas (valores negativos dos escores da EOF1, associados a SPEI-01 positivo) em toda a área de estudo. Observa-se ainda que a maior amplitude da variabilidade está localizada entre o noroeste do Rio Grande do Sul e o sudoeste de Santa Catarina. Por meio dos eventos de escores extremos positivos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 3b), que representam eventos de seca, observamos secas

meteorológicas nos janeiros dos anos de 1952, 1955, 1958, 1964, 1979, 1982, 1985, 1992, 2004, 2012, 2022, 2023 e 2025.

Figura 3 – (a) EOF1 (35,5% da variância total) e (c) EOF2 (23,2% da variância total) do índice SPEI-01 na Região Sul em janeiro (1950-2025) e (b, d) respectivas séries temporais dos escores. Linhas pretas tracejadas indicam ± 1 desvio padrão (σ).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A EOF2 (Figura 3c), por sua vez, apresenta um padrão espacial de dipolo entre os estados do Rio Grande do Sul e do Paraná, os quais apresentam, respectivamente, índice SPEI-01 positivo sobre o Rio Grande do Sul e negativo sobre o Paraná (escores positivos da EOF2) ou padrão contrário (escores negativos da EOF2). Em Santa Catarina observa-se o predomínio de valores negativos do índice SPEI-01, os quais apresentam menor magnitude quando comparados aos observados no Paraná. Em relação aos eventos de escores extremos positivos da EOF2 do índice SPEI-01 (Figura 3d), relacionados a eventos

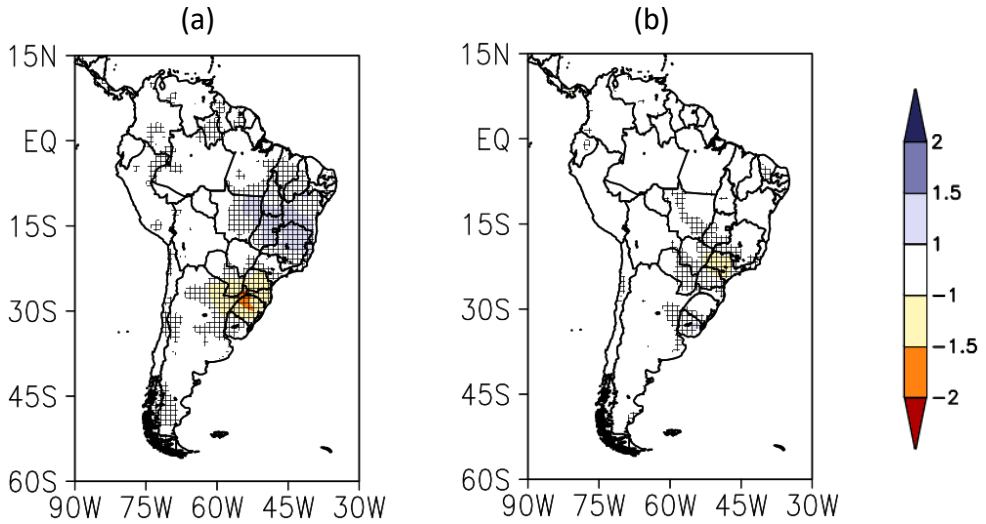
de seca no Paraná e no centro-norte de Santa Catarina, observam-se secas meteorológicas nos janeiros dos anos de 1978, 1984, 1988, 1992, 1998, 2001, 2006, 2013, 2014, 2015, 2019, 2022 e 2024.

O estudo prévio de Viana (2009) avaliou as EOF de precipitação mensal na Região Sul, entre 1988 e 2007. O autor mostra que a EOF1 apresentou padrão espacial de dipolo de anomalias de precipitação entre o Rio Grande do Sul e o Paraná/Santa Catarina, explicando 31,9% da variância total. Este resultado é semelhante à EOF2 do presente estudo (Figura 3c), o que sugere uma mudança no padrão espacial dominante das chuvas, em função do período de análise do presente estudo (1950-2025).

3.2. Circulação atmosférica associada aos padrões espaciais do índice SPEI-01 na Região Sul

Em relação ao índice SPEI anômalo associado aos eventos de escores extremos positivos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 4a), a composição apresenta anomalias negativas mais acentuadas sobre o Rio Grande do Sul e o extremo oeste de Santa Catarina. No restante da Região Sul, são observadas anomalias negativas de menor amplitude. Além disso, observam-se anomalias positivas do SPEI-01 sobre partes das Regiões Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte, com maior abrangência nos estados de Goiás, Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia. Dessa forma, observa-se um padrão de dipolo de anomalias negativas e positivas do SPEI-01 entre a Região Sul e a região central do Brasil, conforme também observado em estudos prévios (*e.g.*, Cunningham; Cavalcanti, 2006; Carpenedo; Lima, 2022; Vasconcellos; Souza, 2022; Carpenedo *et al.*, 2024). Esse padrão espacial de dipolo está associado à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que, juntamente com a convecção na bacia Amazônica, constitui um dos principais componentes da Monção da América do Sul (Jones; Carvalho, 2002). Durante eventos ativos de ZCAS, o transporte de umidade em direção à Região Sul do Brasil, Uruguai e norte da Argentina, via jato de baixos níveis da América do Sul (JBNAS), tende a ser enfraquecido, resultando em redução da precipitação sobre essas regiões (Marengo *et al.*, 2004; Salio *et al.*, 2007). Para a EOF2 (Figura 4b), identificam-se anomalias negativas do SPEI-01 entre o extremo norte do Paraná e o estado de São Paulo. Já no Uruguai, destacam-se anomalias positivas do SPEI-01.

Figura 4 – Composição das anomalias do índice SPEI-01 na América do Sul no mês de janeiro em eventos de escores extremos positivos da (a) EOF1 (1952, 1955, 1958, 1964, 1979, 1982, 1985, 1992, 2004, 2012, 2022, 2023, 2025) e da (b) EOF2 (1978, 1984, 1988, 1992, 1998, 2001, 2006, 2013, 2014, 2015, 2019, 2022, 2024) do índice SPEI-01. Áreas quadriculadas são significativas ao nível de 10%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A TSM associada aos eventos de escores extremos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 5a) apresenta anomalias negativas sobre o Atlântico Sul adjacente às Regiões Sul e Sudeste do Brasil, as quais podem atingir valores de até -1,2°C, especialmente em áreas próximas à Região Sul. Anomalias negativas de TSM no oeste do Atlântico Sul subtropical podem estar relacionadas ao desvio do transporte de umidade proveniente de baixas latitudes em direção à região da ZCAS, com redução da precipitação sobre o sul do Brasil e o nordeste da Argentina (Doyle; Barros, 2002).

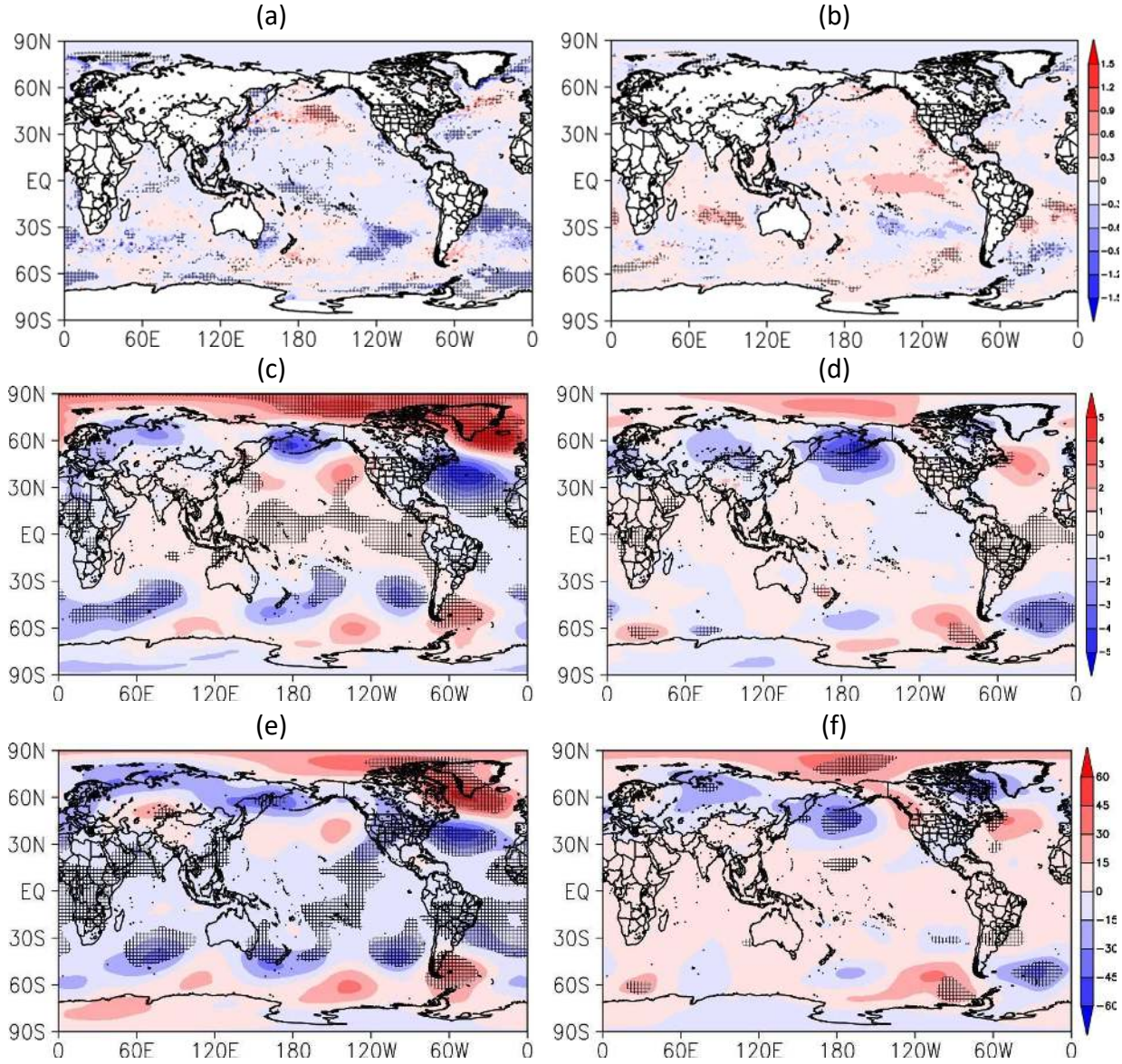
Já para a EOF2 (Figura 5b), observa-se um padrão caracterizado por anomalias positivas no Pacífico equatorial, consistentes com a fase quente do ENOS. Durante eventos de El Niño, a convecção anômala sobre o Pacífico equatorial pode atuar como fonte de ondas de Rossby, cuja propagação em direção à América do Sul contribui para a configuração do padrão Pacífico-América do Sul (*Pacific-South America* – PSA) e para a reorganização da circulação atmosférica sobre o continente (Magaña; Ambrizzi, 2005). Essas anomalias de circulação podem alterar o transporte e a convergência de umidade, bem como a atuação de sistemas atmosféricos associados à precipitação, favorecendo anomalias de sinais opostos entre diferentes setores da América do Sul (Cai *et al.*, 2020; Goudard *et al.*, 2024). No presente estudo, esse mecanismo é consistente com o dipolo identificado pela EOF2, caracterizado por

condições mais úmidas no Rio Grande do Sul e mais secas no Paraná e em Santa Catarina (Figura 3c). Esse contraste pode ser reforçado pelo fortalecimento do ramo oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do JBNAS, que favorece o transporte de umidade em direção ao sudeste da América do Sul e à bacia do Prata, contribuindo para maior precipitação no setor sul e menor convergência de umidade no setor norte da Região Sul. Assim, a atuação conjunta da teleconexão associada ao ENOS e das alterações regionais na circulação e no transporte de umidade constitui um mecanismo plausível para o padrão de dipolo observado na EOF2 (Figura 3c).

Além disso, observa-se a presença de anomalias positivas no Atlântico Sul tropical/subtropical, próximas à costa brasileira, enquanto anomalias negativas predominam nos extratrópicos. Este padrão espacial de anomalias de TSM é semelhante à fase positiva do Dipolo do Atlântico Sul (Nnamchi *et al.*, 2011; Bombardi *et al.*, 2014), sendo parcialmente modulado por teleconexões atmosféricas associadas ao ENOS e transmitidas através da propagação de ondas de Rossby atmosféricas e alterações na circulação subtropical (Yu *et al.*, 2023). O Dipolo do Atlântico Sul influencia a distribuição de precipitação em regiões tropicais e subtropicais, incluindo partes da América do Sul e África. O padrão dipolar altera gradientes térmicos no oceano, que por sua vez modificam a circulação atmosférica regional e os fluxos de umidade. Para a Região Sul, essa configuração de sistemas atmosféricos e oceânicos favorece a redução das chuvas (Muza *et al.*, 2009; Bombardi *et al.*, 2014; Vasconcellos *et al.*, 2023).

A PNMM associada aos escores extremos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 5c) apresenta anomalias negativas no Pacífico tropical e anomalias positivas no sudoeste do Atlântico Sul. As anomalias de alta pressão no Atlântico Sudoeste podem indicar uma menor passagem de ciclones extratropicais (*e.g.*, Simmonds, 2003). Por outro lado, a EOF2 do índice SPEI-01 (Figura 5d) mostra anomalias negativas (positivas) de PNMM na região extratropical do Atlântico Sul (Pacífico Sul), respectivamente. No Atlântico, a redução da PNMM nos extratrópicos se associa a um aumento da PNMM na faixa tropical, que cobre quase todo o Brasil, com exceção do Rio Grande do Sul (sem significância estatística). Isso acaba por inibir os movimentos verticais e a formação de nuvens, contribuindo para condições mais secas entre o extremo norte do Paraná e o estado de São Paulo (Figura 4b).

Figura 5 – Composição das anomalias de (a, b) temperatura da superfície do mar (°C), (c, d) pressão ao nível médio do mar (hPa) e (e, f) altura geopotencial em 500 hPa (m) em janeiro relativo aos escores extremos positivos da (a, c, e) EOF1 (1952, 1955, 1958, 1964, 1979, 1982, 1985, 1992, 2004, 2012, 2022, 2023, 2025) e da (b, d, f) EOF2 (1978, 1984, 1988, 1992, 1998, 2001, 2006, 2013, 2014, 2015, 2019, 2022, 2024) do índice SPEI-01. Áreas quadriculadas são significativas ao nível de 10%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação à altura geopotencial em 500 hPa associada aos escores extremos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 5e), observam-se anomalias positivas no Atlântico Sudoeste, o que é condizente com as anomalias de alta pressão em baixos níveis (Figura 5c), podendo indicar uma maior frequência de bloqueios atmosféricos (Renwick, 2005), os quais impedem a propagação normal de sistemas transientes em direção à Região Sul do país, reduzindo o aporte de umidade e contribuindo para a manutenção de condições

atmosféricas mais secas sobre a região. Além disso, há um predomínio de anomalias negativas em todo o território brasileiro. Na Região Sul, as anomalias negativas de altura geopotencial são mais intensas nos estados do Paraná e de Santa Catarina. Este padrão no Atlântico Sul tropical e subtropical pode estar associado ao enfraquecimento da ASAS. Depois do início da Monção da América do Sul, o escoamento de noroeste no extremo sudoeste da Amazônia se estende em direção à América do Sul central, onde existe a confluência com o escoamento oriundo da ASAS (Vera *et al.*, 2006; Raia; Cavalcanti, 2008), transportando umidade do Atlântico Sul em direção ao Brasil. Esta confluência ocorre porque a Cordilheira dos Andes atua como uma barreira (Silva; Kousky, 2012), havendo uma intensificação regional deste escoamento devido ao JBNAS, que transporta umidade considerável da Amazônia para a bacia do Prata (Berbery; Barros, 2002). Desta forma, o possível enfraquecimento da ASAS em eventos de seca meteorológica na Região Sul (Figura 5e) contribui para a redução do transporte de umidade do Atlântico Sul para esta região.

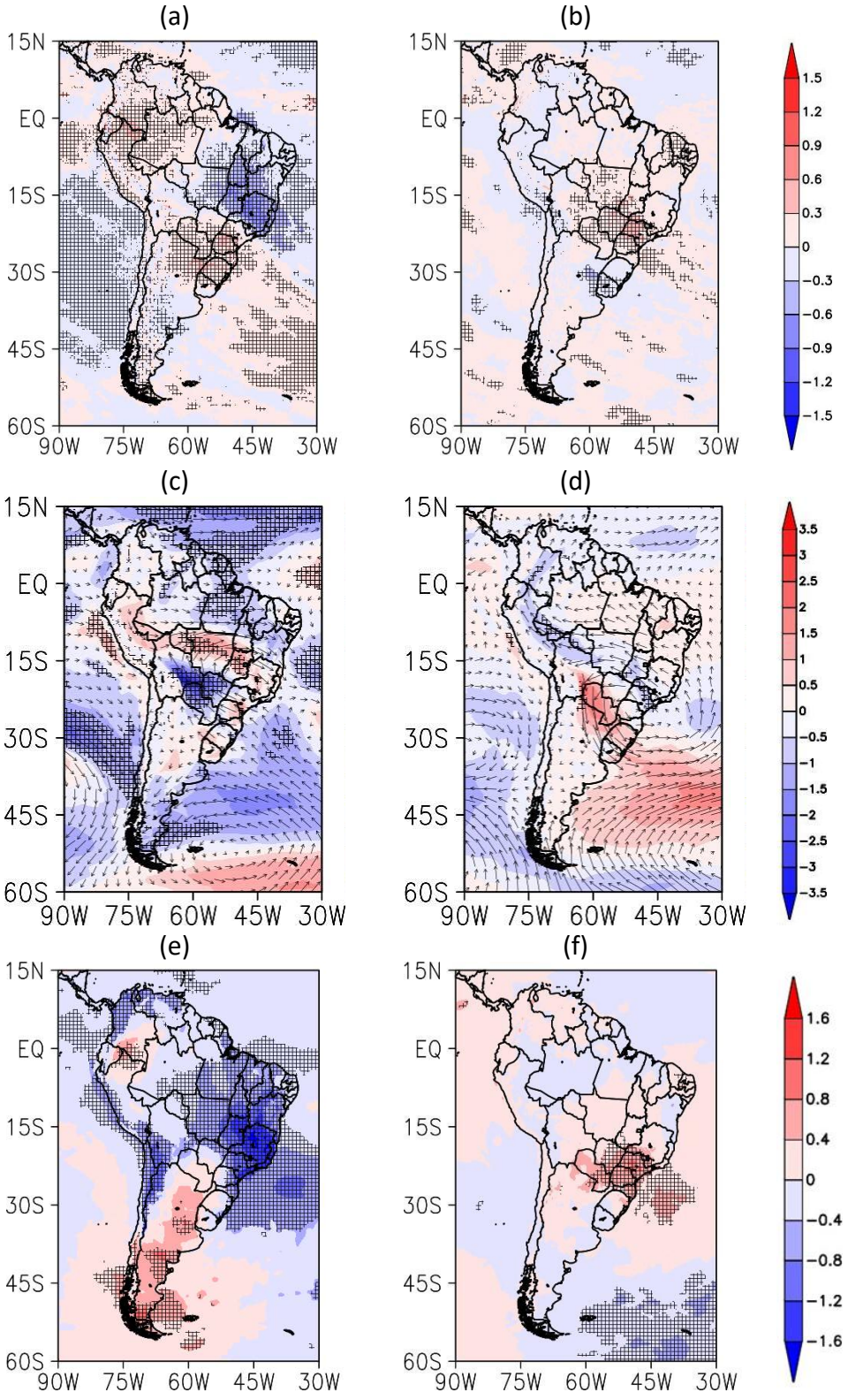
O padrão espacial associado à EOF2 (Figura 5f), por sua vez, apresenta anomalias positivas de altura geopotencial em 500 hPa na Região Sul. Nos três estados, as anomalias atingem aproximadamente +15 m. Essas anomalias positivas, que se estendem em direção ao Atlântico Sul adjacente, podem indicar um possível fortalecimento do ramo oeste da ASAS, que atua impedindo a passagem de sistemas sinóticos e, assim, reduzindo o aporte de umidade para o Brasil e, consequentemente, contribuindo para condições mais secas.

A divergência do fluxo de umidade integrada na vertical associada aos escores extremos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 6a) apresenta anomalias positivas sobre a Região Sul do Brasil, indicando uma redução da umidade na coluna atmosférica e contribuindo para a ocorrência de condições de seca meteorológica (Figura 4a). Em contrapartida, observam-se anomalias negativas sobre as Regiões Sudeste e Centro-Oeste, padrão semelhante ao observado durante episódios de ZCAS fortalecida, com a configuração de gangorra relacionada a esses eventos (Nogués-Paegle; Mo, 1997; Cunningham; Cavalcanti, 2006). A ZCAS fortalecida pode contribuir com as anomalias negativas de TSM no Atlântico Sul tropical e subtropical (Figura 5a), uma vez que a nebulosidade associada reduz a incidência de radiação solar na superfície oceânica, reduzindo assim a TSM (Chaves; Nobre, 2004; Jorgetti *et al.*, 2014). A presença de anomalias de baixa pressão sobre a Região Sudeste, centradas no Triângulo

Mineiro (Figura 5c), intensifica o escoamento em direção às Regiões Sudeste e Centro-Oeste, favorecendo a convergência de umidade, exceto em São Paulo. Além disso, esse ciclone anômalo enfraquece o JBNAS, reduzindo o transporte de umidade amazônica em direção à Região Sul do país e favorecendo os eventos de seca meteorológica. Em relação à EOF2 do índice SPEI-01 (Figura 6b), verificam-se anomalias positivas de divergência do fluxo de umidade integrado na vertical, principalmente no norte e leste do Paraná, próximo à divisa com São Paulo. Esse padrão favorece a ocorrência de secas no norte do Paraná (Figura 4b) e pode estar associado à alta pressão anômala em níveis médios e baixos (Figuras 5d, 5f).

O escoamento em baixos níveis associado aos eventos de escores extremos positivos da EOF1 do índice SPEI-01 (Figura 6c) apresenta um padrão espacial que sugere um enfraquecimento do JBNAS, evidenciado pelos ventos anômalos de sudeste sobre a região Centro-Oeste, o Paraguai e a Bolívia. Esse enfraquecimento reduz o transporte de umidade da Amazônia para o centro-sul da América do Sul, favorecendo as secas meteorológicas na Região Sul do Brasil (Figura 4a). Um JBNAS enfraquecido é condizente com o possível enfraquecimento da ASAS (Figuras 5c, 5e). Além disso, identifica-se a presença de uma circulação ciclônica anômala centrada no Triângulo Mineiro, consistente com as anomalias negativas de PNMM (Figura 5c). Esse resultado é condizente com a fase ativa da Monção da América do Sul (Gan *et al.*, 2009). Em relação à EOF2 do índice SPEI-01 (Figura 6d), identifica-se uma direção predominante dos ventos de noroeste em baixos níveis, formando uma circulação anticiclônica anômala centrada no Paraná. Esta circulação sugere um fortalecimento do JBNAS em direção ao estado do Rio Grande do Sul, indicando eventos úmidos, enquanto o norte da Região Sul encontra-se sob a influência do anticiclone anômalo, favorecendo condições secas. Essa configuração é condizente com o dipolo associado aos escores positivos da EOF2 (Figura 3c).

Figura 6 – Composição das anomalias de (a, b) divergência do fluxo de umidade integrado na vertical (10^{-4} kg m^{-2} s^{-1}), (c, d) vento em 850 hPa (m s^{-1}) e (e, f) temperatura do ar a 2 m (°C) em janeiro relativo aos escores extremos positivos (a, c, e) da EOF1 (1952, 1955, 1958, 1964, 1979, 1982, 1985, 1992, 2004, 2012, 2022, 2023, 2025) e (b, d, f) da EOF2 (1978, 1984, 1988, 1992, 1998, 2001, 2006, 2013, 2014, 2015, 2019, 2022, 2024) do índice SPEI-01. Áreas quadriculadas são significativas ao nível de 10%.

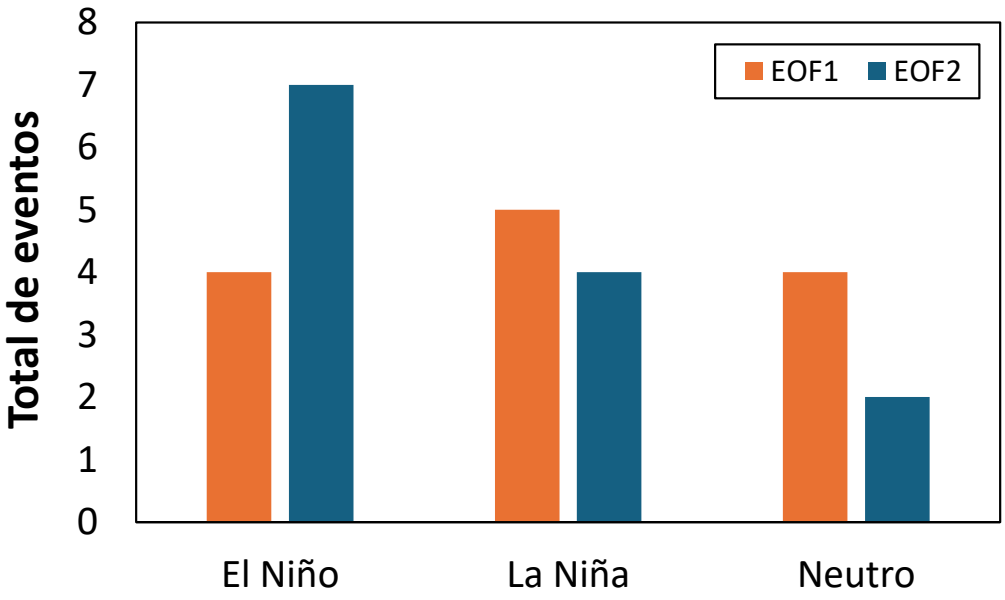


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em relação ao padrão espacial da temperatura do ar a 2 m durante os eventos de escores extremos positivos da EOF1 do índice SPEI-01, os resultados indicam a ocorrência de anomalias negativas de temperatura do ar, atingindo valores de até -0,8 °C no leste dos estados do Paraná e de Santa Catarina, além do extremo leste do Rio Grande do Sul e de grande parte do Brasil (Figura 6e). Essas anomalias podem estar associadas ao resfriamento anômalo do Atlântico Sul subtropical (Figura 5a), que, por condução térmica, resfria a atmosfera adjacente. Em relação à EOF2 (Figura 6f), há a presença de anomalias positivas de temperatura do ar abrangendo os estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, grande parte do Mato Grosso do Sul e sul do Tocantins e Minas Gerais, com magnitudes de até +0,8°C. A ocorrência dessas anomalias positivas de temperatura do ar pode estar relacionada à divergência de umidade anômala (Figura 6b). Esse padrão indica redução da cobertura de nuvens e, consequentemente, aumento da incidência de radiação solar na superfície, resultando em temperaturas mais elevadas.

Avaliando o total de eventos de ENOS em anos com escores extremos positivos das EOF1 e EOF2 do SPEI-01 na Região Sul do Brasil (Figura 7), podemos observar que, para a EOF1, não há predominância de uma fase do ENOS, com 4 eventos de El Niño, 4 eventos neutros e 5 eventos de La Niña. Essa distribuição relativamente equilibrada é consistente com a composição de anomalias de TSM associada à EOF1 (Figura 5a), na qual não se observa um padrão espacial bem definido sobre o Pacífico equatorial característico de uma fase específica do ENOS. Por outro lado, para a EOF2 do SPEI-01 predominam eventos de El Niño, presentes em 7 dos 13 casos, em comparação com 4 eventos de La Niña e 2 eventos neutros. Esse resultado é consistente com as anomalias positivas de TSM observadas no Pacífico equatorial (Figura 5b), sugerindo uma maior associação entre os escores extremos positivos da EOF2 e condições de El Niño.

Figura 7 – Total de eventos de El Niño, La Niña e neutros em janeiro relativo aos escores extremos positivos da EOF1 (1952, 1955, 1958, 1964, 1979, 1982, 1985, 1992, 2004, 2012, 2022, 2023, 2025) e da EOF2 (1978, 1984, 1988, 1992, 1998, 2001, 2006, 2013, 2014, 2015, 2019, 2022, 2024) do índice SPEI-01.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a circulação atmosférica associada aos padrões espaciais dominantes dos eventos de seca meteorológica na Região Sul do Brasil, entre 1950 e 2025.

Os resultados mostraram que o padrão espacial dominante do SPEI-01 explica 35,5% da variância total e corresponde a eventos secos ou úmidos abrangendo toda a Região Sul. Em relação aos padrões espaciais associados aos escores extremos positivos da EOF1 do índice SPEI-01, que representam as secas, a composição apresenta anomalias negativas do SPEI-01 em toda a Região Sul. Concomitantemente, observam-se anomalias positivas do SPEI-01 entre as Regiões Norte e Sudeste do país. Este padrão de dipolo chuva-seca é semelhante ao padrão de ZCAS fortalecida. Tal configuração é favorecida pelo possível enfraquecimento da ASAS, que reduz o aporte de umidade do Atlântico Sul em direção ao continente e contribui para o enfraquecimento do JBNAS. No Atlântico Sudoeste, um centro anômalo de alta pressão pode indicar uma menor passagem de ciclones extratropicais e/ou uma maior frequência de bloqueios atmosféricos. No Atlântico Sul adjacente às Regiões Sul e Sudeste há anomalias negativas de TSM, que podem favorecer uma passagem mais rápida de frentes frias e ciclones extratropicais, reduzindo o transporte de umidade para a Região Sul.

O segundo modo de variabilidade, por sua vez, revelou um padrão espacial de dipolo seco-úmido ou úmido-seco entre o Rio Grande do Sul e os estados do Paraná e de Santa Catarina, explicando 23,2% da variância total. Na composição associada aos escores extremos positivos da EOF2, identificam-se anomalias negativas do SPEI-01 entre o extremo norte do Paraná e o estado de São Paulo. No Pacífico equatorial central-leste há um padrão de anomalias de TSM condizentes com a fase quente do ENOS, enquanto no Atlântico Sul há um padrão espacial semelhante à fase positiva do Dipolo do Atlântico Sul. Esses padrões, somados às anomalias positivas de PNMM e ao fortalecimento do ramo oeste da ASAS, que fortalece o JBNAS, favorecem o déficit de precipitação entre o Paraná e o estado de São Paulo. Houve predominância de condições de El Niño, presentes em 7 dos 13 casos, em concordância com as anomalias positivas de TSM observadas no Pacífico equatorial.

Dessa forma, os resultados evidenciam que os eventos de seca na Região Sul do Brasil resultam da interação entre diferentes processos atmosféricos e oceânicos em múltiplas escalas, os quais modulam a circulação atmosférica e a distribuição espacial da precipitação sobre a América do Sul. A identificação de dois padrões distintos de circulação associados às secas na Região Sul ressalta a complexidade dos mecanismos envolvidos e destaca a importância de considerar tanto forçantes tropicais, como o ENOS, quanto modos de variabilidade do Atlântico Sul na compreensão desses eventos. Por fim, destaca-se a necessidade de ampliar os estudos sobre a ocorrência de eventos de seca na Região Sul do Brasil, considerando que ainda há uma lacuna significativa de pesquisas voltadas à compreensão dos mecanismos climáticos associados e de seus impactos socioeconômicos na região (Fernandes *et al.*, 2021).

Cabe destacar que a utilização exclusiva do mês de janeiro e de um único índice de seca (SPEI-01) pode restringir a compreensão da sazonalidade e de diferentes escalas de persistência dos eventos de seca. Desta forma, estudos futuros são necessários para a compreensão das secas na Região Sul do Brasil com diferentes persistências e meses de atuação. Assim, a continuidade das pesquisas é essencial para subsidiar ações de planejamento e gestão, auxiliando os governos estaduais e municipais a fortalecerem sua capacidade adaptativa frente à variabilidade climática e aos eventos extremos. Nesse sentido, o monitoramento contínuo das condições atmosféricas e sua análise integrada configuram

ferramentas importantes para a mitigação dos impactos, contribuindo, assim, para a formulação de estratégias mais eficazes de adaptação, prevenção e resposta às secas.

REFERÊNCIAS

BACK, Á. J.; SÔNEGO, M.; PEREIRA, J. R. Índices de concentração de chuvas da Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 57–72, 2020. https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.65466

BANCO MUNDIAL. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil (1995-2019)**. 2. ed. Florianópolis: FAPEU, 2020. 156 p.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REIG, F.; LATORRE, B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 10, p. 3001–3023, 2014. https://doi.org/10.1002/joc.3887

BERBERY, E. H.; BARROS, V. R. The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 3, p. 630-645, 2002. https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0630:THCOTL>2.0.CO;2

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. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1832-7

CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R. D.; *et al*. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3

CARPENEDO, C. B.; BONFIM, A. L. S.; LIMBERGER, L. Variabilidade climática e circulação atmosférica anômala durante os extremos chuvosos em Curitiba - PR. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 242-264, 2024. https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17190

CARPENEDO, C. B.; LIMA, M. P. Padrões climáticos dos extremos chuvosos em Uberlândia - MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 486-508, 2022. https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15630

CASTRO, César Nunes de. Histórico da ação estatal em recursos hídricos no Brasil. In: INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Água: problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Rio de Janeiro: Ipea, 2022. v. 1, p. 25-61. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/4/Cap.1_Historico_da_acao_estatal.pdf. Acesso em: 7 jun. 2025.

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, 2004. https://doi.org/10.1029/2003GL018647

CUNNINGHAM, C. A. C.; CAVALCANTI, I. F. A. Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1165-1180, 2006. https://doi.org/10.1002/joc.1309

DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 15, n. 23, p. 3394-3410, 2002. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3394:MLLCAP>2.0.CO;2

FERNANDES, V. *et al.* Secas e os impactos na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 561-584, 2021. https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74717

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, 873, 2022. https://doi.org/10.3390/atmos13060873

GAN, M. A.; RODRIGUES, L. R.; RAO, V. B. Monção na América do Sul. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; SILVA DIAS, M. A. F. (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 297-316.

GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. Brazil is in water crisis – it needs a drought plan. **Nature**, v. 600, p. 218-220, 2021. https://doi.org/10.1038/d41586-021-03625-w

GOMES, M. S.; ALBUQUERQUE CAVALCANTI, I. F.; MÜLLER, G. V. 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. **Weather and Climate Extremes**, v. 34, p. 100404, 2021. https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100404

GOUDARD, G.; LIMBERGER, L.; CARPENEDO, C. B. Influence of Eastern, Central and Mix El Niño on the variability of rainfall in southeastern South America. **Frontiers in Earth Science**, v. 12, p. 1-17, 2024. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1134782

HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. https://doi.org/10.1002/qj.3803

HERSBACH, H.; DEE, D. ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsletter, n. 147, p. 7, abr. 2016. Disponível em: https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production. Acesso em: 11 ago. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: panorama do Paraná – população (Censo 2022)**. Rio de Janeiro, 2022a. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama. Acesso em: 7 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: panorama do Paraná – área territorial (2024)**. Rio de Janeiro, 2024a. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama. Acesso em: 7 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: panorama de Santa Catarina – população (Censo 2022)**. Rio de Janeiro, 2022b. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/panorama. Acesso em: 7 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: panorama de Santa Catarina – área territorial (2024)**. Rio de Janeiro, 2024b. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/panorama. Acesso em: 7 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: panorama do Rio Grande do Sul – população (Censo 2022)**. Rio de Janeiro, 2022c. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama. Acesso em: 7 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE Cidades: panorama do Rio Grande do Sul – área territorial (2024)**. Rio de Janeiro, 2024c. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama. Acesso em: 7 jun. 2025.

IPCC. **Annex II: Glossary** [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 2897-2930, 2022.

JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Active and break phases in the South American monsoon system. **Journal of Climate**, v. 15, p. 905-914, 2002. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0905:AABPIT>2.0.CO;2

JORGETTI, T.; DA SILVA DIAS, P.L.; DE FREITAS, E.D. The relationship between South Atlantic SST and SACZ intensity and positioning. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 3077-3086, 2014. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1998-z

LIEBMANN, B. *et al.* An observed trend in central South American precipitation. **Journal of Climate**, v. 17, n. 22, p. 4357–4367, 2004. https://doi.org/10.1175/3205.1

MAGAÑA, V.; AMBRIZZI, T. Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters. **Atmósfera**, v. 18, n. 4, p. 211–233, 2005.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 49–54, 2016.

MARENGO, J.A.; SOARES, W.R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2

MUZA, M. N.; CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Intraseasonal and interannual variability of extreme dry and wet events over southeastern South America and the subtropical Atlantic during austral summer. **Journal of Climate**, v. 22, p. 1682-1699, 2009. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2257.1

NAUMANN, G. *et al.* **O episódio de seca extrema de 2019-2021 na bacia de La Plata**. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia, 2022.

NNAMCHI, H.; LI, J.; ANYADIKE, R. Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean? **Journal of Geophysical Research**, v. 116, D15, 2011. https://doi.org/10.1029/2010JD015579

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. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2

NORTH, G. R.; BELL, T. L.; CAHALAN, R. F.; MOENG, F. J. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 7, p. 699-706, 1982. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2

RAIA, A.; CAVALCANTI, I. F. A. The life cycle of the South American monsoon system. **Journal of Climate**, v. 21, p. 6227-6246, 2008. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2249.1

RENWICK, J. A. Persistent Positive Anomalies in the Southern Hemisphere Circulation. **Monthly Weather Review**, v. 133, p. 977-988, 2005. https://doi.org/10.1175/MWR2900.1.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E.J. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 4, p. 1290-1309, 2007. https://doi.org/10.1175/MWR3305.1

SENEVIRATNE, S. I. *et al.* Weather and climate extreme events in a changing climate. In: MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (eds.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 1513-1766. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013

SILVA, V. B. S.; KOUSKY, V. E. The South American monsoon system: climatology and variability. In: WANG, S.-Y. (ed.). **Modern Climatology**. Rijeka: InTech, 2012. https://doi.org/10.5772/54192

SIMMONDS, I. Modes of atmospheric variability over the Southern Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 108(C4), 8078, 2003. https://doi.org/10.1029/2000JC000542

STORCH, H. von; ZWIERS, F. W. **Statistical analysis in climate research**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948. https://doi.org/10.2307/210739

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

VASCONCELLOS, F. C.; SOUZA, J. N.; DERECZYNSKI, C. P.; LUIZ-SILVA, W.; 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. https://doi.org/10.1002/joc.8163

VERA, C. et al. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, p. 4977-5000, 2006. https://doi.org/10.1175/JCLI3896.1

VIANA, D. R. **Comportamento espaço-temporal da precipitação na Região Sul do Brasil utilizando dados TRMM e SRTM**. 2009. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation-evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, p. 1696-1718, 2010. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. New York: Academic Press, 2006.

WREGE, M. S. *et al.* **Atlas climático da Região Sul do Brasil**. Brasília, 2012.

YU, L.; ZHONG, S.; VIHMA, T.; SUI, C.; SUN, B. A change in the relationship between ENSO and the South Atlantic Subtropical Dipole in the past four decades. **EGUsphere (preprint)**. 2023. https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2436