Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

TENDÊNCIA DA ESTAÇÃO CHUVOSA NA AMÉRICA DO SUL ENTRE 1981 E 2021 PARA O PRODUTO RADS

Trend of the rainy season in South America between 1981 and 2021 based on the RADS product

Tendencia de la estación lluviosa en América del Sur entre 1981 y 2021 a partir del producto RADS

Julio Cezar Costa
Programa de Pós-Graduação em Geografia Física
Universidade de São Paulo (USP)
São Paulo, São Paulo, Brasil
julioczcta@gmail.com

Maria Elisa Siqueira Silva
Universidade de São Paulo (USP)
São Paulo, São Paulo, Brasil
elisasiq@usp.br

Resumo: A estação chuvosa constitui uma dimensão central da sazonalidade hidroclimática na América do Sul, e suas mudanças podem se expressar não apenas pela variação no volume precipitado, mas também pela reorganização do calendário sazonal. Este estudo analisa as tendências (Mann-Kendall e Sen) de início, término, duração e precipitação acumulada na América do Sul, entre 1981 e 2021, utilizando o produto *Rainy and Dry Seasons* (RADS), derivado do CHIRPS. Os resultados indicam que a reorganização sazonal é regionalmente diferenciada e não pode ser reduzida a um único sinal. O aumento da duração mais expressivo e abrangente foi identificado no norte do continente, entre 10ºS e 10ºN, associado ao início mais precoce e ao término mais tardio. No sudeste do continente, o aumento da duração esteve associado principalmente ao início precoce. A contração no sudeste da Bolívia esteve associada tanto ao início tardio quanto ao término precoce. No leste do Nordeste brasileiro,

a contração esteve mais associada ao início tardio. Além da expansão ou contração, foram identificadas áreas com deslocamento temporal do período chuvoso. Áreas com deslocamento tardio mais abrangentes foram identificadas na região central do Brasil, enquanto áreas com deslocamento precoce ocorreram principalmente na faixa equatorial. Sinais semelhantes de encurtamento ou expansão no Nordeste brasileiro foram associados ao posicionamento anômalo da ZCIT. Em áreas subtropicais, anomalias anticiclônicas ou ciclônicas estiveram associadas ao encurtamento ou expansão da estação chuvosa.
Palavras-chave: Início. término. Duração. Estação Chuvosa. RADS.

Abstract: The rainy season is a central dimension of hydroclimatic seasonality in South America, and its changes may be expressed not only through variations in precipitation volume but also through the reorganization of the seasonal calendar. This study analyzes trends (Mann-Kendall and Sen) in onset, demise, duration, and accumulated precipitation during the rainy season in South America from 1981 to 2021, using the Rainy and Dry Seasons (RADS) product derived from CHIRPS. The results indicate that seasonal reorganization is regionally differentiated and cannot be reduced to a single signal. The most expressive and widespread increase in duration was identified in the northern part of the continent, between 10°S and 10°N, associated with earlier onset and later demise. In southeastern South America, the increase in duration was mainly associated with earlier onset. The contraction in southeastern Bolivia was associated with both later onset and earlier demise. In eastern Northeast Brazil, contraction was more strongly associated with later onset. In addition to expansion or contraction, areas with temporal displacement of the rainy period were identified. More extensive areas with delayed displacement were identified in central Brazil, while areas with earlier displacement occurred mainly along the equatorial belt. Similar signals of shortening or expansion in Northeast Brazil were associated with the anomalous positioning of the ITCZ. In subtropical areas, anticyclonic or cyclonic anomalies were associated with shortening or expansion of the rainy season.
Keywords: Onset. Demise. Duration. Rainy Season. RADS.

Resumen: La estación lluviosa constituye una dimensión central de la estacionalidad hidroclimática en América del Sur, y sus cambios pueden expresarse no solo mediante variaciones en el volumen precipitado, sino también por la reorganización del calendario estacional. Este estudio analiza las tendencias (Mann-Kendall y Sen) del inicio, término, duración y precipitación acumulada durante la estación lluviosa en América del Sur entre 1981 y 2021, utilizando el producto Rainy and Dry Seasons (RADS), derivado de CHIRPS. Los resultados indican que la reorganización estacional es regionalmente diferenciada y no puede reducirse a una única señal. El aumento de duración más expresivo y amplio se identificó en el norte del continente, entre 10°S y 10°N, asociado con un inicio más temprano y un término más tardío. En el sudeste del continente, el aumento de la duración estuvo asociado principalmente con un inicio temprano. La contracción en el sudeste de Bolivia estuvo asociada tanto con un inicio tardío como con un término temprano. En el este del Nordeste brasileño, la contracción estuvo más asociada con el inicio tardío. Además de la expansión o contracción, se identificaron áreas con desplazamiento temporal del período lluvioso. Las áreas más extensas con desplazamiento tardío se identificaron en la región central de Brasil, mientras que las áreas con desplazamiento temprano ocurrieron principalmente en la franja

ecuatorial. Señales similares de acortamiento o expansión en el Nordeste brasileño estuvieron asociadas con el posicionamiento anómalo de la ZCIT. En áreas subtropicales, anomalías anticiclónicas o ciclónicas estuvieron asociadas con el acortamiento o la expansión de la estación lluviosa.

Palabras clave: Inicio. Término. Duración. Temporada de lluvias. RADS.

Submetido em: 17/06/2026
Aceito para publicação em: 05/09/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

A estação chuvosa constitui uma dimensão central da sazonalidade hidroclimática em regiões tropicais e subtropicais pois organiza no calendário anual o período de maior disponibilidade hídrica, atividade convectiva e concentração da precipitação, com implicações diretas para agricultura, geração de energia, gestão de recursos hídricos e riscos associados a extremos hidroclimáticos (BOMBARDI; KINTER; FRAUENFELD, 2019; REBOITA et al., 2023). Sua caracterização envolve métricas distintas: início, término, duração e precipitação acumulada. Essas variáveis não variam obrigatoriamente no mesmo sentido, já que o acumulado sazonal depende também da intensidade média da chuva, da frequência dos eventos e da organização intraestacional da precipitação (GONZÁLEZ et al., 2007; LIEBMANN; MARENGO, 2001; MARENGO et al., 2017; SPARACINO; ARGIBAY; ESPINDOLA, 2021). Analisar conjuntamente calendário e volume da precipitação permite reconhecer alterações que seriam ocultadas por abordagens baseadas apenas em totais anuais ou sazonais.

A delimitação objetiva da estação chuvosa, contudo, depende do método adotado. Parte da literatura utiliza limiares pluviométricos ou critérios de persistência em dados diários e pêntadas, procedimentos úteis para o monitoramento regional, mas sensíveis ao valor de corte, à variabilidade local da chuva e à intensidade das transições entre os períodos seco e úmido (GAN; KOUSKY; ROPELEWSKI, 2004; GARCIA; CALHEIROS; KAYANO, 2016; MARENGO et al., 2001). Outra abordagem emprega a Radiação de Onda Longa (ROL) como indicador da convecção profunda, permitindo acompanhar a progressão espacial da atividade convectiva em áreas com baixa densidade de pluviômetros, embora baixos valores de ROL não correspondam necessariamente à precipitação efetiva em superfície (FRANCHITO et al., 2008; HOREL; HAHMANN; GEISLER, 1989; KOUSKY, 1988; KROEGER et al., 2021). Em contraposição aos limiares fixos, métodos baseados na anomalia acumulada da precipitação definem início e término a partir da própria estrutura temporal da série, permitindo uma estimativa local da estação chuvosa em cada ponto de grade ou estação meteorológica (LIEBMANN; MARENGO, 2001; RAUSCHER et al., 2007). Essa abordagem foi refinada em produtos globais, como o Rainy and Dry Season (RADS) (BOMBARDI; KINTER; FRAUENFELD, 2019), que sistematiza a estimativa de início, término, duração e precipitação acumulada em bases diárias de precipitação, com procedimentos para reduzir falsas detecções, tratar transições ambíguas e

mascarar áreas com regimes bimodais ou pouco sazonais (BOMBARDI et al., 2017; BOMBARDI; KINTER; FRAUENFELD, 2019).

Na América do Sul, as tendências da precipitação têm sido amplamente investigadas a partir de totais anuais, extremos pluviométricos, trimestres sazonais ou domínios regionais específicos. Estudos anteriores identificaram aumento da precipitação e de eventos intensos em setores subtropicais, redução em áreas do Chile central, sinais de secamento no Nordeste e no Centro-Sul do continente, além de mudanças associadas à variabilidade interanual e decadal dos oceanos Pacífico e Atlântico (BOISIER et al., 2018; GARREAUD et al., 2009, 2017; HAYLOCK et al., 2006; QUINTANA; ACEITUNO, 2011). Embora esses trabalhos sejam fundamentais para compreender a variabilidade hidroclimática regional, eles nem sempre permitem distinguir se uma mudança no volume precipitado resulta de alteração do início, do término, da duração ou da intensidade da chuva durante a estação.

Estudos mais recentes passaram a enfatizar diretamente as métricas do calendário chuvoso. Na Amazônia meridional, entre 1998 e 2012, foram identificados atraso do início (0,38 ± 0,05 dia ano^{-1}; aproximadamente 5,7 dias no período; p = 0,06), antecipação do término (1,34 ± 0,76 dia ano^{-1}; aproximadamente 20 dias; p = 0,01) e redução da duração da estação chuvosa (1,81 ± 0,97 dia ano^{-1}; aproximadamente 27 dias; p = 0,01), associados às anomalias de TSM na região Niño 4, à posição do jato subtropical do Hemisfério Sul, ao desmatamento e às interações entre esses fatores (LEITE-FILHO; COSTA; FU, 2020). Na transição Amazônia–Cerrado, entre 1971 e 2010, foram observados atraso do início em 76% das estações pluviométricas, antecipação do término em 84% e redução da duração em 88%, com condições mais secas nas áreas desmatadas (DEBORTOLI et al., 2015).

Nos Andes centrais do Peru, entre 1965 e 2013, foi identificada redução da duração da estação chuvosa (aproximadamente três dias por década), associada principalmente ao atraso do início; eventos de El Niño favoreceram início tardio e término precoce, enquanto eventos de La Niña estiveram associados ao comportamento oposto (GIRÁLDEZ et al., 2020). As variações do início também foram relacionadas à propagação da região convectiva do Sistema de Monção da América do Sul, do Caribe em direção à Amazônia central (GIRÁLDEZ et al., 2020). Em uma análise do território peruano entre 1981 e 2019, não foram identificadas tendências históricas significativas de início, término ou duração nas regiões andinas,

enquanto o início mais precoce e o aumento da duração ocorreram apenas na Amazônia peruana meridional (DE LA CRUZ et al., 2024).

No semiárido nordestino, entre 1983 e 2018, não foram identificadas tendências significativas nas datas de início e término ou na duração da estação chuvosa, embora tenham sido observadas redução da precipitação anual (7 ± 2 mm ano^{-1}), diminuição da taxa de precipitação (0,3 mm dia^{-1} por década) e ampliação dos dias secos consecutivos (12 dias por década) (SPARACINO; ARGIBAY; ESPINDOLA, 2021). Esses resultados indicam que a estação chuvosa responde de forma regionalmente diferenciada e que o calendário, a duração e o volume não devem ser tratados como métricas equivalentes. Neste estudo, essas métricas são analisadas de forma integrada, por meio da combinação das tendências de início e término, para distinguir padrões de contração, expansão e deslocamento temporal da estação chuvosa.

Apesar desses avanços, ainda há uma lacuna na avaliação integrada das tendências da estação chuvosa em escala sul-americana. Parte dos estudos se concentra em regiões específicas, como Amazônia, Brasil Central, Andes, Nordeste ou Chile, enquanto outros priorizam totais de precipitação, extremos ou médias sazonais fixas. Ainda é necessário examinar, em uma perspectiva continental, como as tendências de início e término se combinam para produzir expansão, contração ou deslocamento temporal da estação chuvosa, e em que medida essas mudanças se relacionam ao volume precipitado durante o período úmido. Diante disso, este estudo analisa as tendências de início, término, duração e precipitação acumulada da estação chuvosa na América do Sul entre 1981 e 2021, com o objetivo de identificar os principais padrões espaciais de reorganização do período chuvoso. A análise busca compreender se as mudanças recentes se expressam pela expansão, contração ou deslocamento temporal da estação, e não apenas por alterações no volume precipitado.

2. DADOS E MÉTODOS

Nesta seção, apresentamos a descrição dos dados de precipitação e atmosféricos utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos empregados para o cálculo das tendências, a classificação dos padrões de reorganização temporal, a seleção dos eventos

extremos e a análise das relações entre as métricas da estação chuvosa e os campos atmosféricos.

2.1. Dados de precipitação e campos atmosféricos

Para caracterizar as métricas de início, término e duração da estação chuvosa, foram utilizados dados do produto *Rainy and Dry Seasons* (RADS), desenvolvido pelo Departamento de Geografia da Texas A&M *University*. O RADS foi obtido a partir da precipitação diária do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS), versão 2.0, e disponibiliza estimativas objetivas das datas de início, término, duração da estação chuvosa e seca. Para o volume de chuva acumulado durante a estação chuvosa, utilizou-se diretamente o dado diário bruto do CHIRPS, somando-se a precipitação entre as datas de início e término indicadas pelo RADS, para cada ano e cada ponto de grade. O CHIRPS foi acessado por meio do Google *Earth Engine*. Este conjunto de dados apresenta dados globais para a faixa zonal entre 50°S e 50°N, com resolução espacial de 0,05°, e, disponibiliza séries diárias e mensais de precipitação desde 1981 até o período atual (FUNK et al., 2015). Neste estudo, foi considerado o intervalo de 1981 a 2021. A utilização do CHIRPS é recorrente em estudos climáticos e hidrológicos devido à sua longa série temporal, alta resolução espacial e integração entre estimativas por satélite e dados pluviométricos observados, o que favorece a representação da precipitação em áreas com cobertura irregular de estações de superfície (COSTA et al., 2019; FUNK et al., 2015).

A metodologia do RADS é baseada no método de anomalia acumulada da precipitação proposto por Liebmann e Marengo (2001), posteriormente adaptado por Bombardi *et al.* (2017) e Bombardi, Kinter e Frauenfeld (2019). De forma geral, o método calcula a acumulação anômala da precipitação diária ao longo do ano hidrológico. O início da estação chuvosa é identificado no dia imediatamente posterior ao mínimo da curva de anomalia acumulada, quando a série passa a indicar aumento persistente da precipitação em relação à média anual. O término corresponde ao ponto em que essa curva atinge seu máximo, marcando a transição para o período de redução relativa da precipitação. Assim, diferentemente de métodos baseados em limiares fixos, o RADS define o calendário chuvoso a partir da própria estrutura temporal da série pluviométrica em cada ponto de grade. Para reduzir falsas detecções, as

datas inicialmente obtidas pelo método da anomalia acumulada são verificadas quanto à presença de valores discrepantes, definidos com base no intervalo interquartil. Os casos ambíguos são recalculados após a suavização da curva e a análise da mudança persistente de sinal de sua primeira derivada. O término da estação é calculado retrospectivamente, reduzindo a influência de eventos isolados de precipitação, enquanto resultados persistentemente discrepantes e áreas com regimes bimodais ou trimodais são mascarados (BOMBARDI; KINTER; FRAUENFELD, 2019).

Para a caracterização dos padrões atmosféricos associados às tendências e aos eventos extremos de início e término da estação chuvosa, foram utilizados campos mensais da reanálise ERA5, produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), no âmbito do *Copernicus Climate Change Service*. O ERA5 corresponde à quinta geração de reanálises atmosféricas do ECMWF e fornece estimativas do estado da atmosfera e da superfície em escala global, em grade regular de 0,25° × 0,25°, equivalente a aproximadamente 31 km na região equatorial, com série retrospectiva estendida até 1950 (BELL et al., 2021; HERSBACH et al., 2020). Foram utilizadas variáveis disponibilizadas diretamente pela reanálise, representativas da circulação atmosférica, da umidade, da convecção e da estrutura dinâmica da troposfera: divergência do fluxo de umidade integrado verticalmente (VIMD), radiação de onda longa (ROL) e altura geopotencial em 850 e 250 hPa. O VIMD foi obtido diretamente da base, não sendo calculado a partir dos componentes do vento e da umidade específica. As linhas de corrente em 850 e 250 hPa foram apresentadas em conjunto com os campos de altura geopotencial para auxiliar a interpretação da circulação em baixos e altos níveis. Antes das análises, foram removidos o ciclo sazonal e a tendência linear das séries mensais. Esses resultados indicam que a estação chuvosa responde de forma regionalmente diferenciada e que o calendário, a duração e o volume não devem ser tratados como métricas equivalentes.

2.2. Análise de tendência

As tendências das métricas da estação chuvosa foram calculadas para séries anuais de início, término, duração e precipitação acumulada durante a estação chuvosa, para cada ponto de grade da América do Sul, para o período de 1981 a 2021, por meio do teste não

paramétrico de *Mann-Kendall* (KENDALL; STUART, 1968; MANN, 1945), robusto à ausência de normalidade e à presença de valores extremos na série temporal. A estatística do teste é dada por:

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

em que x_i e $x_j$são valores consecutivos da série (para $j > i$) e sgn, a função sinal, que assume o valor +1, 0 ou −1, conforme a diferença entre x_i e x_j seja positiva, nula ou negativa, respectivamente. A significância, para p = 0,05, foi avaliada por meio da estatística padronizada, de acordo com as equações (KENDALL; STUART, 1968; MANN, 1945):

$$sgn(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & se\ x_j - x_k > 0 \\ 0, & se\ x_j - x_k = 0 \\ -1, & se\ x_j - x_k < 0, \end{cases} \quad (2)$$

A magnitude da tendência foi estimada pelo método de Sen (estimador Theil-Sen) (SEN, 1968; THEIL, 1992), de acordo com:

$$\beta = mediana\left(\frac{x_j - x_k}{j - k}\right), \ para\ j > k, \quad (3)$$

em que β representa a magnitude da tendência por unidade de tempo.

2.3 Classificação dos padrões de reorganização temporal da estação chuvosa

Foi realizada a classificação de tendência dos padrões de duração da estação chuvosa ao longo do tempo, a partir da combinação entre os sinais das tendências de início e término. A etapa foi construída a partir das tendências estatisticamente significativas das datas de início e término da estação chuvosa, considerando p < 0,05, isto é, sob a hipótese nula de ausência de tendência, uma probabilidade inferior a 5% de obter uma estatística tão extrema quanto a observada. Como as métricas temporais foram expressas em dias por ano, tendências positivas no início indicam atraso da instalação da estação chuvosa, enquanto tendências negativas indicam início mais precoce. Para o término, tendências positivas indicam encerramento mais tardio, e tendências negativas, término mais precoce.

Com base na combinação dos sinais de tendência das métricas da estação chuvosa em cada ponto de grade, foram definidos quatro padrões: contração sazonal (início mais tardio e término mais precoce); expansão sazonal (início mais precoce e término mais tardio); deslocamento tardio (ambas as bordas mais tardias, sem redução expressiva da duração); e deslocamento precoce (ambas as bordas antecipadas, sem alteração equivalente da duração).

2.4 Núcleos representativos e campos atmosféricos associados

Após a análise espacial das tendências temporais em toda a América do Sul, foram selecionados dois núcleos com tendência significativa, com o objetivo de aprofundar a interpretação temporal e atmosférica dos padrões associados. A Área 1 corresponde ao centro-sul da Bolívia, setor associado ao domínio monçônico continental e à transição entre a Amazônia meridional, os Andes tropicais e o interior subtropical da América do Sul. A Área 2 corresponde ao leste do Nordeste brasileiro, setor de sazonalidade costeiro-atlântica, cuja estação chuvosa apresenta calendário distinto daquele observado no núcleo monçônico continental. Para cada uma destas áreas, foram extraídas e analisadas séries anuais médias de início, término, duração e precipitação acumulada na estação chuvosa, no período de 1981 a 2021.

Para investigar os padrões atmosféricos associados à variabilidade extrema do calendário chuvoso, foram selecionados eventos extremos de início e término em cada área.

A classificação foi feita a partir das séries padronizadas por z-score, considerando como extremos os anos com $|z| \geq 0{,}8$. Valores negativos de z-score indicam eventos precoces, enquanto valores positivos indicam eventos tardios. Os campos atmosféricos foram analisados de forma simultânea ao mês de ocorrência do evento em cada ano. Assim, para cada evento extremo de início e término, foi considerado o mês correspondente à data efetiva de início ou término da estação chuvosa naquele ano, e não o mês climatológico. Em seguida, antes do cálculo das correlações, removemos das séries as tendências lineares de longo prazo, de modo que os coeficientes expressassem principalmente a covariabilidade interanual entre as variáveis. Foram calculadas correlações lineares de Pearson entre as datas de início ou término extremos e os campos atmosféricos mensais correspondentes. As variáveis atmosféricas consideradas nessa etapa foram VIMD, ROL, altura geopotencial em 850 hPa e

250 hPa e circulação do ar em baixos e altos níveis. A significância estatística das correlações foi definida para p = 0,05, indicada por hachuras nos mapas.

Após a caracterização atmosférica de casos extremos de início e término, foram avaliadas as relações entre as principais métricas da estação chuvosa. Para isso, foram calculadas correlações lineares de Pearson, para cada ponto da grade, entre a data de início e a duração, entre a data de término e a duração, e entre a precipitação acumulada e a duração da estação chuvosa. As séries das datas de início e término foram previamente tratadas de modo a respeitar sua natureza periódica e sua continuidade ao longo do ano hidrológico: as datas foram identificadas com o valor do dia juliano. A análise dos campos de correlação teve como objetivo identificar em quais regiões a duração da estação chuvosa está mais associada à antecipação ou ao atraso do início, à persistência ou antecipação do término, ou ao volume precipitado durante o período úmido.

Valores negativos (positivos) entre início e duração indicam que estações mais longas tendem a ocorrer quando o início é mais precoce (tardio). Valores positivos (negativos) entre término e duração indicam que estações mais longas estão associadas a términos mais tardios (precoces). Já correlações positivas (negativas) entre precipitação acumulada e duração indicam que estações mais longas tendem a acumular maiores (menores) volumes de chuva. A significância estatística das correlações foi definida para p igual a 0,05.

3. RESULTADOS

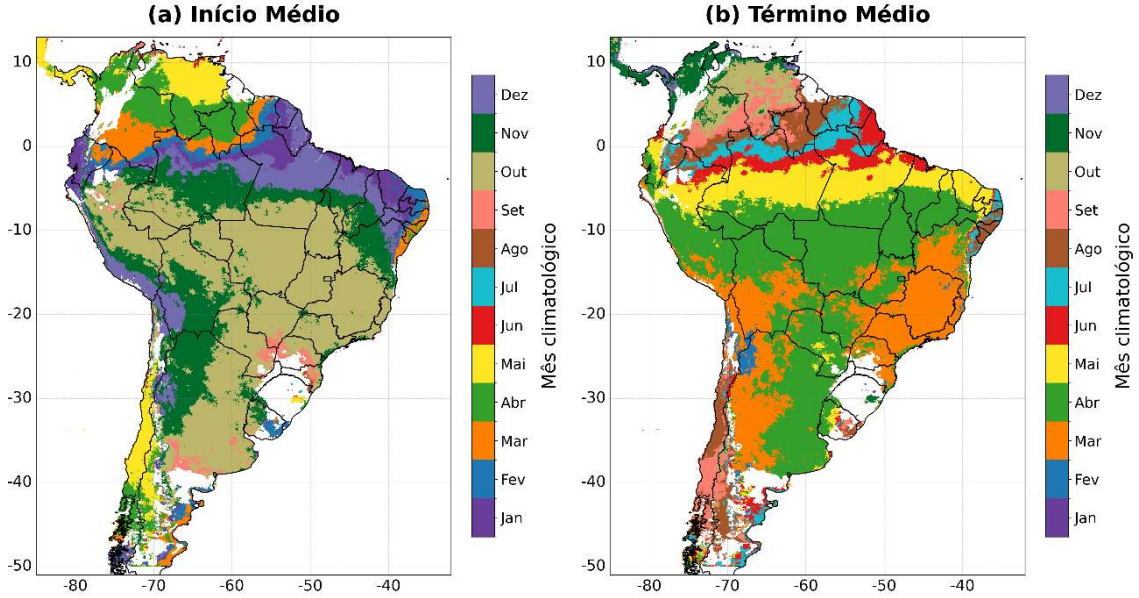
Apresentamos, na seção de resultados, a classificação média do início e término da estação chuvosa, os resultados de tendência das métricas analisadas e os principais padrões de reorganização temporal do período chuvoso na América do Sul.

3.1. Padrão médio da estação chuvosa na América do Sul

A Figura 1 mostra a regionalização climatológica da América do Sul para as datas de início e término da estação chuvosa na América do Sul entre 1981 e 2021. No extremo norte do continente, incluindo Venezuela, norte da Colômbia, Roraima, Guiana e Suriname, o início ocorre principalmente entre abril e maio, enquanto o término se concentra entre agosto e novembro. Esse calendário acompanha a migração sazonal da Zona de Convergência

Intertropical (ZCIT) para latitudes mais setentrionais e caracteriza a estação chuvosa tropical do hemisfério norte (RAO; HADA, 1990; REBOITA et al., 2010). No hemisfério sul, a maior parte das áreas tropicais apresenta início da estação chuvosa entre outubro e dezembro e término entre março e maio, caracterizando igualmente a estação chuvosa destas áreas. O início da estação chuvosa em áreas tropicais do hemisfério sul aparece primeiro em setembro-outubro, no noroeste amazônico, especialmente no Peru e em áreas adjacentes, e avança posteriormente para o sul e sudeste do continente, alcançando o Brasil Central e o Sudeste durante a primavera austral. O término, por sua vez, ocorre em geral entre o fim de março e maio no domínio monçônico. Esse comportamento é coerente com a evolução sazonal do Sistema Monçônico da América do Sul (SMAS), que envolve aquecimento continental, intensificação da convecção, transporte de umidade amazônica, atuação do Jato de Baixos Níveis (JBN) e organização da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (GAN; KOUSKY; ROPELEWSKI, 2004; GRIMM, 2011; MARENGO et al., 2004; NIETO-FERREIRA; RICKENBACH, 2011).

Figura 1 - Climatologia da data de (a) início e (b) do término da estação chuvosa na América do Sul. As áreas em branco representam regiões que não apresentaram uma única estação chuvosa bem definida ao longo do ano.



O noroeste amazônico apresenta uma das estações chuvosas mais longas do continente, com início em outubro-novembro e término em maio-junho, de forma que algumas áreas apresentem até nove meses chuvosos. Já a Amazônia central concentra o período chuvoso

principalmente entre dezembro e maio. No leste do Nordeste brasileiro, a estação chuvosa ocorre principalmente entre fevereiro-março e julho-agosto, em associação principalmente à intensificação dos alísios de sudeste com o fortalecimento da alta pressão subtropical do Atlântico Sul (HOUNSOU-GBO et al., 2015; KOUSKY, 1979; RAO; DE LIMA; FRANCHITO, 1993; YAMAZAKI; RAO, 1977). No semiárido nordestino, a estação chuvosa é mais curta (dezembro-janeiro a maio) e menos volumosa, com acumulados regionais inferiores a 490 mm.

No Brasil Central, a estação chuvosa ocorre, em média, entre outubro e abril, com duração aproximada de 165 dias e acumulado superior a 1.400 mm. Esse calendário corresponde ao núcleo continental do regime monçônico, no qual a precipitação se intensifica rapidamente na primavera, atinge máximos no verão e enfraquece no início do outono.

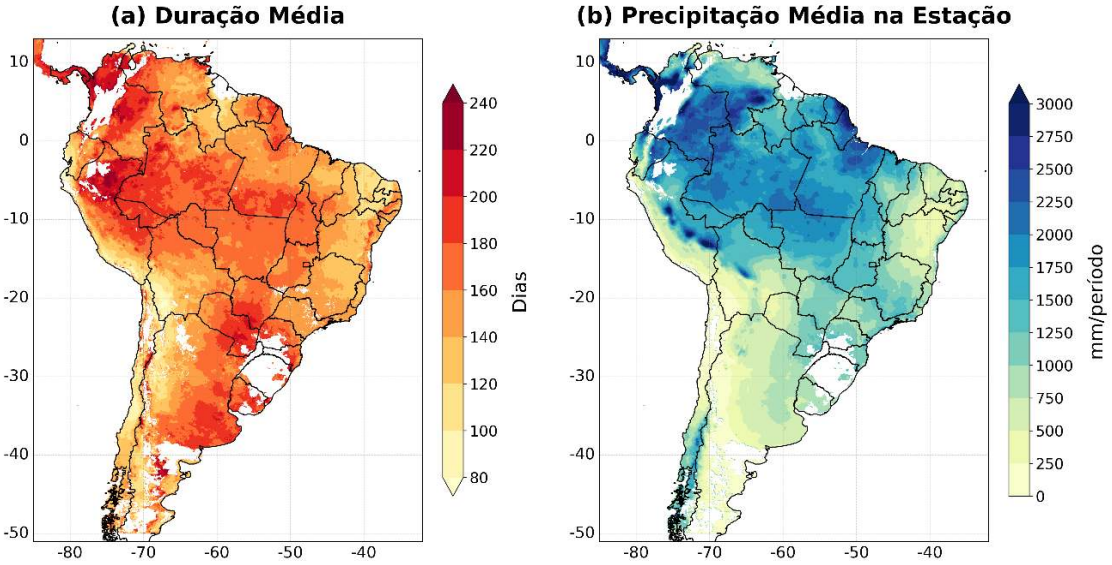
A Bacia do Prata, o norte da Argentina e o Paraguai, áreas subtropicais, apresentam calendário chuvoso parcialmente semelhante ao do domínio monçônico, com estação concentrada no semestre quente. Essa semelhança indica a influência do transporte meridional de calor e umidade pelo escoamento de norte-noroeste, particularmente o realizado pelo JBN a leste dos Andes, que conecta a umidade amazônica aos setores subtropicais da América do Sul (MARENGO et al., 2004; REBOITA et al., 2010). Na encosta oriental dos Andes, entre aproximadamente 15 °S e 30 °S, o período chuvoso também se aproxima do calendário monçônico, mas com menor duração (122 dias), refletindo o controle da topografia e da disponibilidade regional de umidade.

No Chile central e no sudoeste da Argentina, a estação chuvosa ocorre entre abril-maio e agosto-setembro, caracterizando um regime de inverno associado à circulação extratropical, aos ventos de oeste e à passagem de sistemas frontais (GARREAUD et al., 2009; QUINTANA; ACEITUNO, 2011; REBOITA et al., 2010). Esse padrão difere dos regimes tropicais e monçônicos uma vez que o período úmido não está ligado à convecção continental de verão, mas à maior frequência e intensidade de sistemas sinóticos de latitudes médias durante o inverno austral (GARREAUD et al., 2009; QUINTANA; ACEITUNO, 2011; REBOITA et al., 2010).

A duração e o volume precipitado (Figura 2) apresentam máximos nos setores norte e central da Amazônia, onde a estação chuvosa pode ultrapassar 200 dias e os acumulados sazonais superar 2.000 mm. Esse padrão resulta da combinação entre longa persistência do período úmido, entrada de vapor d'água pelo Atlântico tropical, reciclagem de umidade pela floresta e atuação recorrente de sistemas convectivos e mecanismos de convergência em

baixos níveis (FERREIRA; REBOITA, 2022; MARENGO et al., 2004; NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991). Em contraste, áreas semiáridas, setores andinos, porções do Chaco e regiões extratropicais apresentam menores acumulados, mesmo quando a duração não é extremamente curta, indicando que o volume sazonal depende também de outros fatores, como a intensidade média, a frequência dos eventos chuvosos e a regularidade intraestacional da chuva.

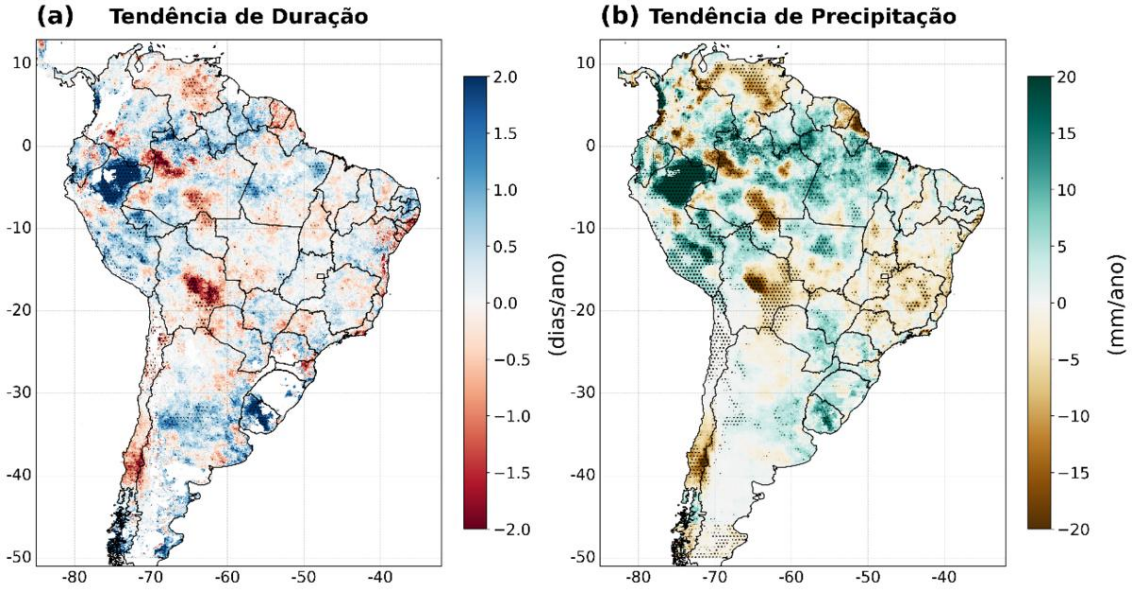
Figura 2 - Climatologia da (a) duração média, (b) precipitação média no período chuvoso. As áreas em branco representam regiões que não apresentaram uma única estação chuvosa bem definida ao longo do ano.



3.2. Tendências da estação chuvosa

A Figura 3 apresenta as tendências da duração e da precipitação acumulada na estação chuvosa da América do Sul entre 1981 e 2021. As tendências positivas mais amplas de duração concentram-se no norte e noroeste do continente, abrangendo norte do Peru, sul da Colômbia, Equador, norte do Amazonas, Roraima, Guiana, Suriname, além de setores do Acre, sul do Amazonas, norte da Bolívia e sul do Peru. Nessa faixa, o aumento da duração aparece associado, em grande parte, ao início mais precoce e ao término mais tardio da estação chuvosa (Figura 4), resultando em prolongamento da janela úmida. O aumento da precipitação acumulada acompanha esse padrão em parte expressiva do norte da América do Sul, indicando correspondência espacial entre expansão temporal da estação e maior volume sazonal.

Figura 3 - Distribuição espacial da tendência da (a) duração da estação e do (b) volume da estação chuvosa na América do Sul no período de 1981–2021, em dias por ano, com indicação dos valores estatisticamente significativos (p < 0,05) por pontos.



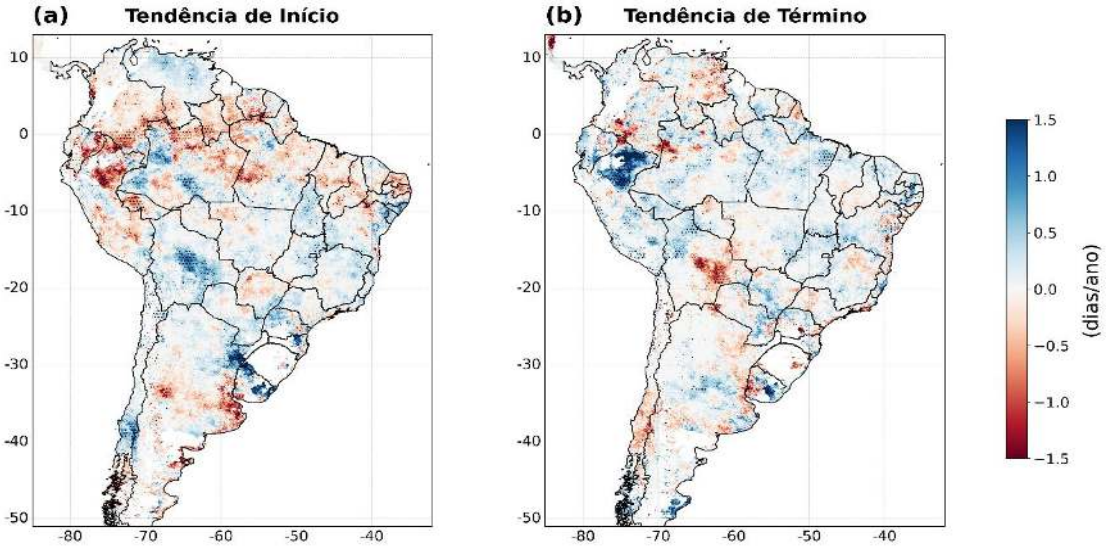
Outro núcleo de tendência positiva de duração da estação chuvosa ocorre no sudeste da América do Sul, especialmente entre o Uruguai e a região central da Argentina. Nesse setor, a tendência de aumento da duração também coincide com sinais positivos de precipitação acumulada. No entanto, essa relação não é uniforme em todo o continente, pois duração e volume podem responder de forma distinta à intensidade média da chuva, à frequência dos eventos e à distribuição intraestacional da precipitação (LIEBMANN et al., 2007).

As tendências negativas de duração aparecem de forma mais evidente no centro-sul da Bolívia e áreas adjacentes, em manchas localizadas no sul e oeste do Amazonas, na faixa leste do Nordeste brasileiro (entre o sul da Bahia e Pernambuco) e no centro-norte do Chile (Figura 3a). Nestas áreas, a redução da duração, associada à diminuição do volume da precipitação (Figura 3b), resulta da combinação entre início mais tardio e término mais precoce (Figura 4). No centro-leste do Brasil, incluindo setores da Bahia, norte de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro, a tendência negativa significativa de precipitação está associada à tendência de retração da estação chuvosa em apenas algumas áreas (norte de Minas Gerais, norte da Bahia, faixa leste), porém, não significativa.

A tendência de atraso do início da estação chuvosa em algumas áreas, assim como a antecipação do término, também pode contribuir para a diminuição do volume de

precipitação. A análise das métricas da estação chuvosa em áreas mais localizadas permitiria concluir com maior certeza sobre as causas de alteração do volume da precipitação ao longo do tempo.

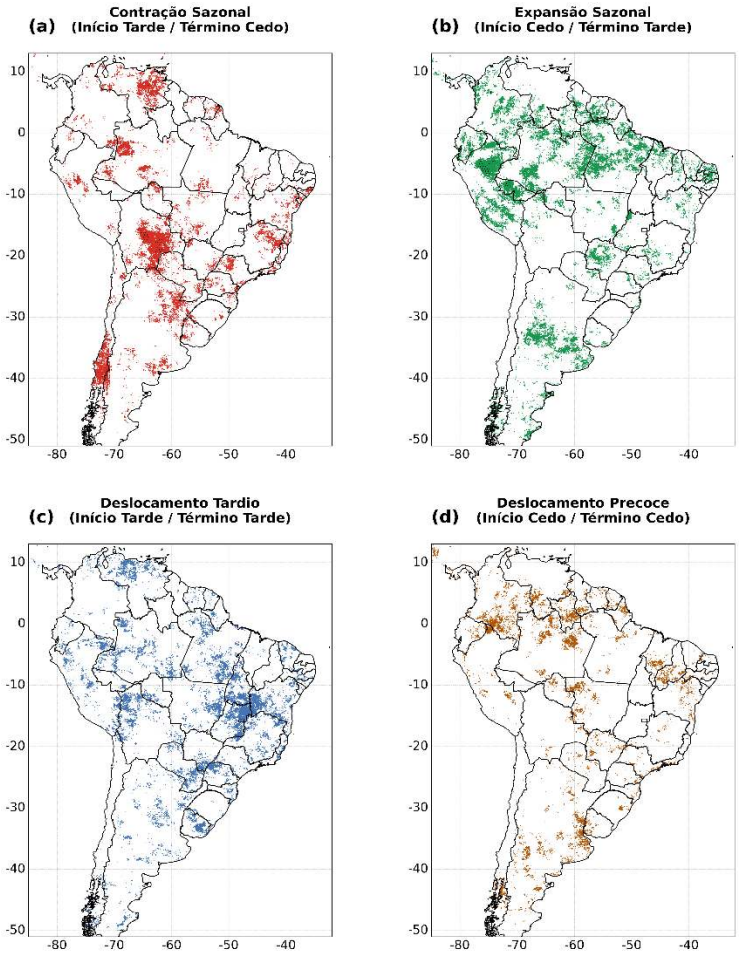
Figura 4 - Distribuição espacial da tendência do (a)início e do (b) término da estação chuvosa na América do Sul no período 1981–2021, em dias por ano, com indicação dos pontos estatisticamente significativos (p < 0,05).



3.3 Padrões de reorganização temporal da estação chuvosa

A Figura 5 combina as tendências de início e término da estação chuvosa, indicando a reorganização da duração e deslocamentos temporais em quatro padrões: contração sazonal, expansão sazonal, deslocamento tardio e deslocamento precoce. A contração sazonal, definida por início mais tardio e término mais precoce, concentra-se no centro-sul da Bolívia e áreas adjacentes, em setores da Venezuela e Guiana, no centro-sul do Chile, em núcleos do sul e oeste do Amazonas, no nordeste da Argentina, oeste de São Paulo, no norte de Minas Gerais e leste do Brasil. Esse padrão indica perda da janela chuvosa em suas duas extremidades. Em grande parte dessas áreas, a contração coincide com tendência negativa da precipitação acumulada, reforçando a associação entre encurtamento do período úmido e redução do volume sazonal.

Figura 5 - Distribuição espacial dos padrões de reorganização das datas de início e término da estação chuvosa na América do Sul, no período 1981–2021, definidos a partir da combinação das áreas com tendência estatisticamente significativa (p < 0,05): tendência de (a) contração sazonal; (b) de expansão sazonal; (c) de deslocamento tardio; e, (d) de deslocamento precoce.



A expansão sazonal, definida por início mais precoce e término mais tardio, destaca-se no norte e noroeste da América do Sul, abrangendo oeste amazônico, leste da Colômbia, algumas áreas do Equador, norte do Peru, setores do Acre e da Amazônia ocidental brasileira, além de áreas que se estendem em direção ao norte/nordeste do continente (Figura 5b). Também ocorrem áreas de expansão da duração da estação chuvosa na região central da Argentina. Esse padrão apresenta forte correspondência com as tendências positivas de duração e, em vários setores, com o aumento da precipitação acumulada.

O deslocamento tardio ocorre quando início e término apresentam tendência para datas mais tardias. Esse padrão aparece principalmente em áreas do centro-leste e centro-sul da América do Sul, incluindo porções do Brasil Central, Goiás, Tocantins, Bahia, norte da Bolívia

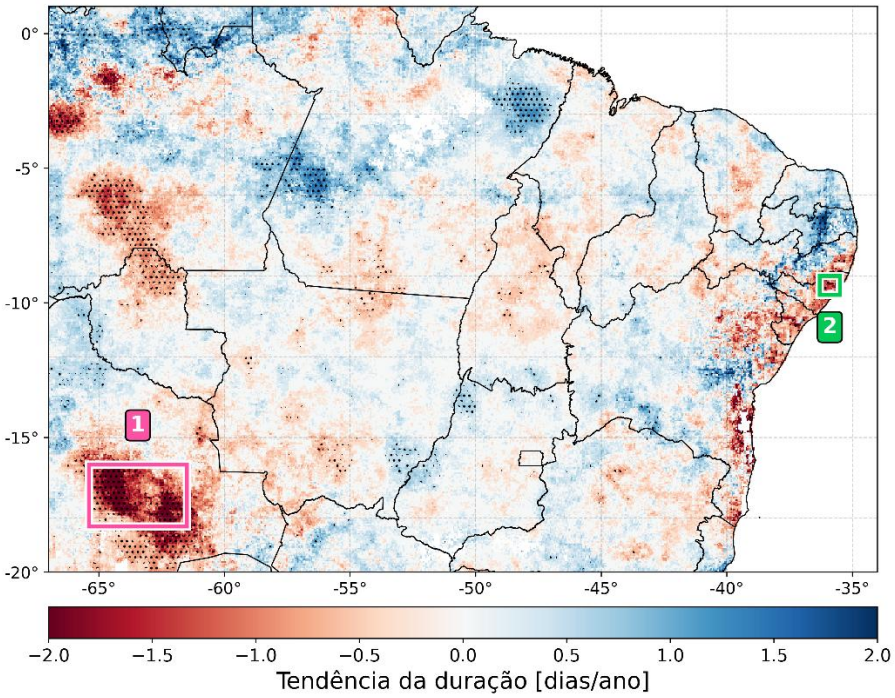
e setores do sudeste do continente (Figura 5c). Nesses casos, a estação não necessariamente se encurta, mas passa a ocorrer mais tarde no ano hidrológico. Em partes do centro-leste do Brasil, esse deslocamento aparece junto à redução da precipitação acumulada, sugerindo que o atraso do início pode comprometer o volume sazonal mesmo quando o término também se torna mais tardio. Esse resultado diferencia a presente análise de interpretações baseadas apenas na duração da estação chuvosa, pois mostra que a reorganização do calendário pode ocorrer sem mudança expressiva no comprimento total da estação.

O deslocamento precoce, definido por início e término mais precoces, ocorre em área menor do continente, com sinais mais abrangentes em setores equatoriais (5ºS - 5ºN) e no sudeste da América do Sul. Esse padrão indica antecipação do período chuvoso no calendário hidrológico. Em áreas onde o deslocamento precoce coincide com aumento de duração ou de volume, o início mais antecipado pode contribuir para maior acumulado sazonal. Em outros setores, no entanto, o deslocamento precoce representa sobretudo mudança na posição temporal da estação, sem necessariamente indicar aumento expressivo do volume precipitado.

3.4 Núcleos representativos da contração da estação chuvosa

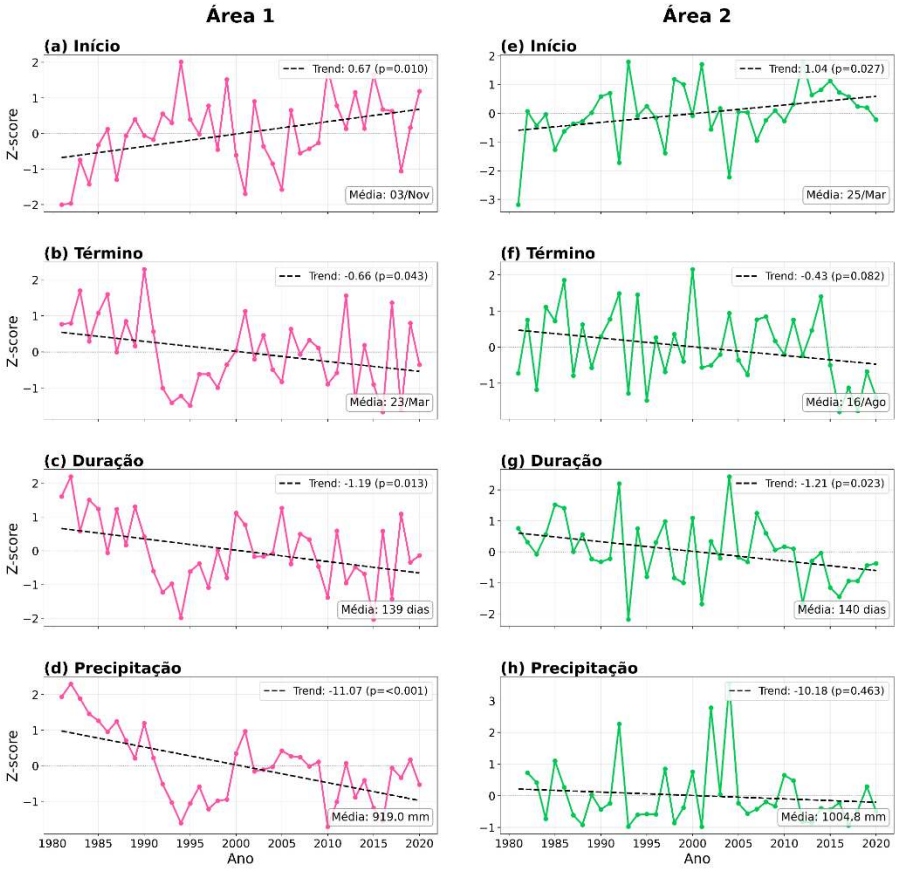
Para detalhar os mecanismos atmosféricos associados à redução da duração da estação chuvosa, foram selecionados dois núcleos representativos com tendência negativa estatisticamente significativa, mas inseridos em regimes climáticos distintos. A Área 1 corresponde ao centro-sul da Bolívia, em zona de transição entre a Amazônia meridional, os Andes tropicais e o interior subtropical da América do Sul. A Área 2 corresponde ao leste do Nordeste brasileiro, setor próximo ao Atlântico Sul cuja estação chuvosa apresenta calendário distinto daquele observado no domínio monçônico continental. A seleção desses dois núcleos permite comparar dois tipos de contração: uma contração associada simultaneamente ao atraso do início e à antecipação do término, e outra associada principalmente ao atraso da instalação da estação chuvosa. A Figura 6 apresenta a localização dos dois núcleos sobre o campo de tendência da duração da estação chuvosa.

Figura 6 - Localização dos dois núcleos com tendência significativa de contração da duração da estação chuvosa na América do Sul, sobrepostos ao campo de tendência da duração, expressa em dias por ano. As áreas numeradas correspondem a: (1) centro-sul da Bolívia e (2) leste do Nordeste brasileiro. As hachuras indicam áreas com tendência estatisticamente significativa ao nível de 5% ($p \leq 0,05$).



A Área 1, situada no centro-sul da Bolívia, apresenta um núcleo de contração da estação chuvosa ao longo do período 1981-2021. O início médio ocorre em 03 de novembro, com tendência significativa de atraso de 0,67 dias/ano, somando ~ 27 dias no período ($p = 0,010$; figura 7a). O término médio ocorre em 23 de março, com tendência de antecipação de 0,66 dias/ano ou 27 dias no período ($p = 0,043$; figura 7b). A duração climatológica da estação chuvosa é de 139 dias e encurta a uma taxa de −1,19 dias/ano, somando 54 dias no período ($p = 0,013$; figura 7c), enquanto que a precipitação climatológica de 919 mm reduz-se a uma taxa de 11,07 mm/ano, somando ~ 443 mm no período ($p < 0,001$; figura 7d), o que corresponde a uma redução de quase 50 % do valor climatológico. Notavelmente, o encurtamento da duração da estação chuvosa distribui-se de forma aproximadamente equilibrada entre o atraso do início e a antecipação do término, indicando compressão da duração simultaneamente nas duas bordas do ciclo sazonal.

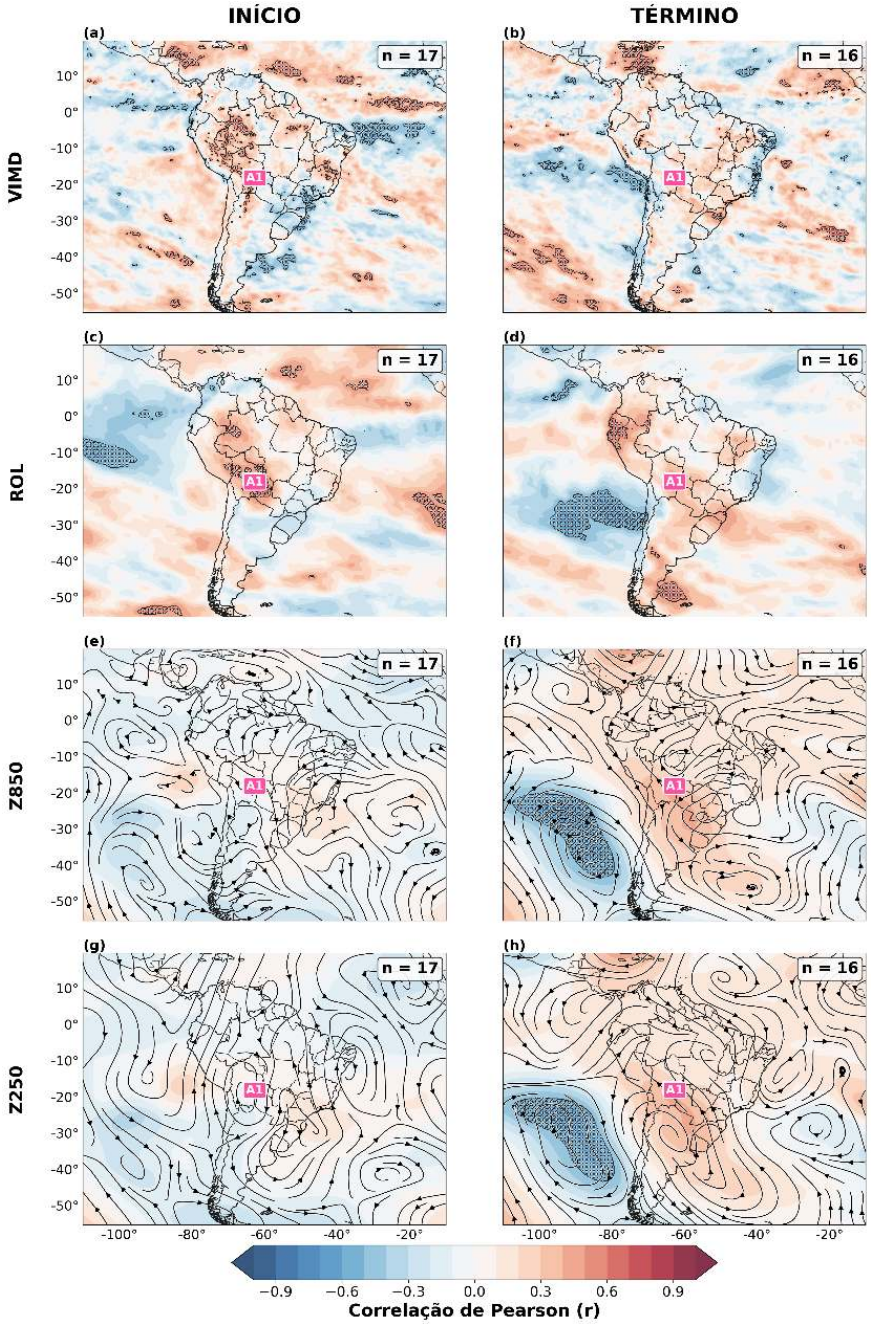
Figura 7 - Séries anuais padronizadas com z-score para início, término, duração e precipitação acumulada da estação chuvosa da Área 1 (a–d, respectivamente) e Área 2 (e–h, respectivamente), entre 1981 e 2021. As linhas coloridas representam a variabilidade anual padronizada de cada variável, enquanto as linhas tracejadas indicam a tendência linear no período considerado.



Os campos de correlação mostrados na Figura 8 indicam que apenas os períodos de início tardio da estação chuvosa na Área 1 estão associados a condições atmosféricas que inibam a formação de nebulosidade e chuva, como anomalias positivas de VIMD e ROL. Em baixos e altos níveis são observadas anomalias positivas de altura geopotencial, o que não favorece a ocorrência de condições atmosféricas associadas à intensificação de convecção. Em altos níveis, observa-se anomalias ciclônicas na região da Bolívia, levando ao enfraquecimento da AB e possível diminuição das atividades convectivas associadas. Os campos de correlação associados às datas de término precoce da estação chuvosa na Área 1 indicam anomalias negativas de ROL, VIMD e altura geopotencial, além de anomalias ciclônicas em altos e baixos níveis. Assim, os períodos que mais contribuíram para a diminuição da precipitação durante a estação chuvosa da Área 1 foram os de início tardio. Análises adicionais, selecionando apenas os dias relativos à retração da estação chuvosa, em relação à início tardio e término precoce

de cada ano, podem contribuir para aprofundar a compreensão sobre os campos atmosféricos associados a estes períodos.

Figura 8 – Campos de correlação linear entre as datas dos eventos extremos de início (coluna esquerda) e término (coluna direita) da estação chuvosa na Área 1 e campos atmosféricos no domínio da América do Sul: (a) VIMD para períodos de início, (b), ROL para períodos de início, (c) altura geopotencial e linha de corrente em 850 para períodos de início, (d) altura geopotencial e linha de corrente em 250 hPa para períodos de início, (e) VIMD para períodos de término, (f) ROL para períodos de término, (g) altura geopotencial e linha de corrente em 850 hPa para períodos de término, (h) altura geopotencial e linha de corrente em 250 hPa para períodos de término. As hachuras indicam áreas com correlação estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$). No canto superior direito de cada mapa está indicado o número de anos extremos selecionados a partir do limiar $|z| \geq 0,8$ (n).



A contração da estação chuvosa na Área 2, situada na costa leste do Nordeste brasileiro, está associada a padrões atmosféricos de circulação distintos daqueles observados para a contração na Área 1.O início médio ocorre em 25 de março, com tendência significativa de atraso de 1,04 dias/ano (p = 0,027; figura 7e), somando ~ 42 dias ao longo do período.

O término médio ocorre em 16 de agosto, com tendência de antecipação de 0,43 dias/ano (p = 0,082; figura 8f), somando ~17 dias no período.

A duração média é de 140 dias e encurta a uma taxa de 1,21 dias/ano (p = 0,023; figura 8g), somando ~ 48 dias em todo o período, enquanto a precipitação média de 1.004,8 mm reduz-se em 10,18 mm/ano (p = 0,463; figura 7h), totalizando uma redução de 407 mm em todo o período, equivalente a ~ 41 % de redução.

Assim como observado na Área 1, o encurtamento da estação chuvosa na Área 2 configura compressão das duas bordas do ciclo sazonal, embora dominado pelo atraso significativo do início, enquanto a antecipação do término não atinge significância estatística. A redução da precipitação acumulada, embora expressiva em magnitude, não apresenta tendência estatisticamente significativa ao longo do período.

Na Área 2, os períodos de início tardio (precoce) e término precoce (tardio), que respondem à retração (extensão) da duração da estação chuvosa, estão associados a condições atmosféricas que inibem (favorecem) e comprovam atividades convectivas e a formação de nebulosidade e precipitação, como anomalias positivas (negativas) de ROL, VIMD e altura geopotencial em baixos e altos níveis. Para os períodos de início tardio (precoce), observamos, respectivamente, anomalias de difluência (confluência) e confluência (difluência) do ar em baixos e altos níveis sobre a Área 2, também contribuindo para a inibição da convecção.

Os campos de correlação para períodos de término precoce (tardio) indicam anomalias positivas (negativas) de altura geopotencial na faixa zonal ao norte de 20ºS, associadas a anomalias negativas (positivas) concêntricas ao sul, localizadas no sudoeste do Atlântico Sul, além de anomalias ciclônicas (anticiclônicas) nesta mesma posição.

Tais padrões de circulação contribuem para a inibição (favorecimento) de atividades convectivas na Área 2 (Nordeste), em períodos de término precoce (tardio) da estação chuvosa, provendo maior difluência (confluência) do ar em latitudes equatoriais.

Em latitudes equatoriais, padrões espaciais das anomalias de ROL e VIMD com sinais opostos em posições mais ao norte e mais ao sul indicam que a variação da duração da estação chuvosa está associada à variação do deslocamento meridional da ZCIT.

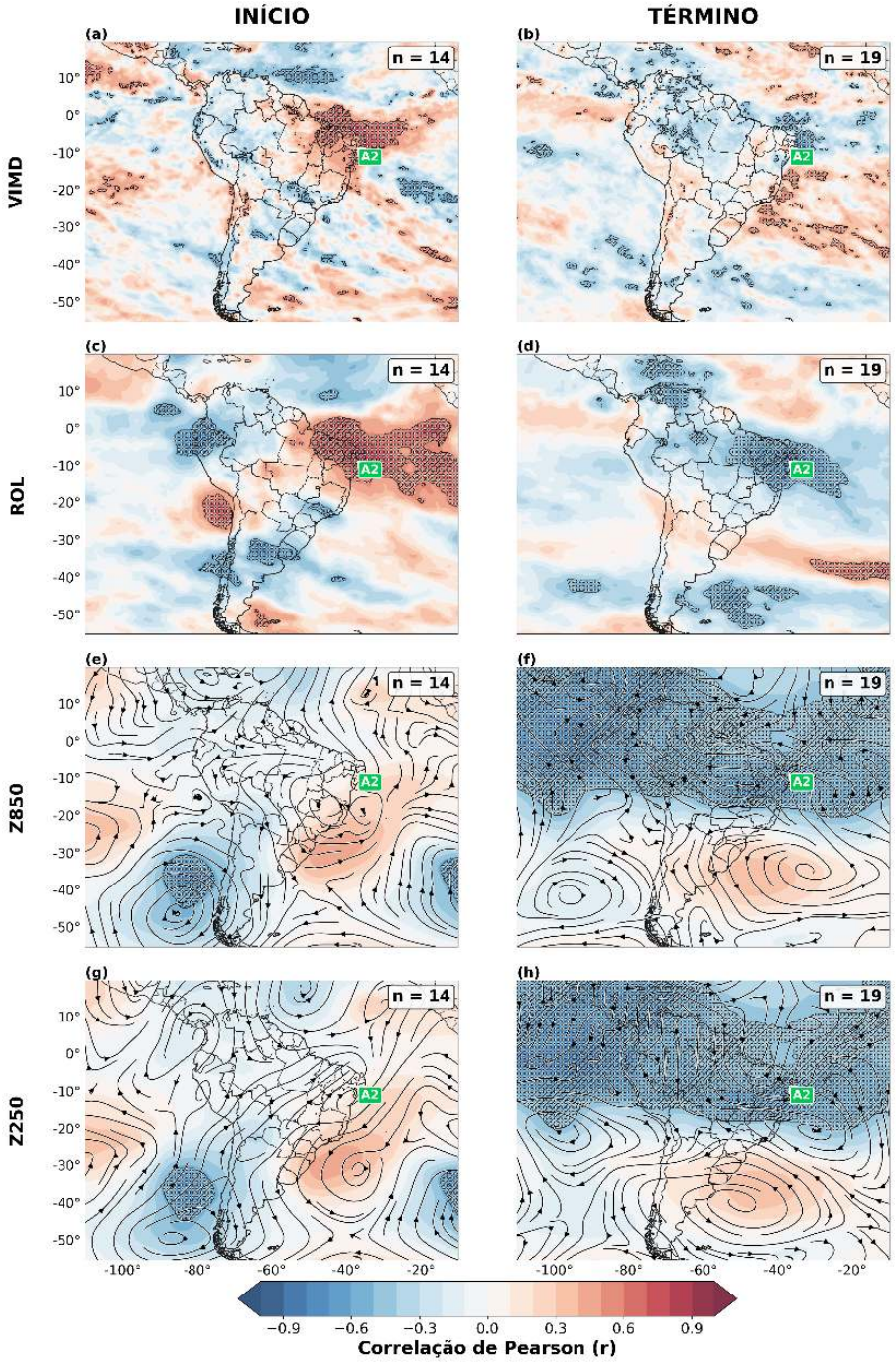
Além da variação meridional da ZCIT, observamos uma estrutura de gangorra na faixa equatorial, entre a Amazônia (setor oeste) e o Nordeste brasileiro (setor leste), assim como identificado por outros autores (DE SOUZA; KAYANO; AMBRIZZI, 2005).

Em períodos de início tardio (precoce) da estação chuvosa na Área 2, observamos anomalias negativas (positivas) de VIMD e ROL sobre a Amazônia, e, positivas (negativas) sobre o Nordeste.

Por outro lado, em períodos de término precoce (tardio), verificamos anomalias positivas (negativas) em quase toda a faixa zonal tropical sul, mas com valores muito mais intensos sobre a Área 2 e adjacências. Além da componente equatorial, as anomalias de atividade convectiva na Área 2 também estão associadas a anomalias de circulação em latitudes subtropicais e médias.

No caso da Área 1 (Bolívia), a propagação de ondas baroclínicas em latitudes médias apresenta maior amplitude meridional enquanto, para o caso da Área 2, a amplitude meridional é menor. Esse padrão verticalmente coerente sustenta a permanência da estação chuvosa por períodos mais prolongados.

Figura 9 – Campos de correlação linear entre as datas dos eventos extremos de início (coluna esquerda) e término (coluna direita) da estação chuvosa na Área 2 e campos atmosféricos no domínio da América do Sul: (a) VIMD para períodos de início, (b), ROL para períodos de início, (c) altura geopotencial e linha de corrente em 850 para períodos de início, (d) altura geopotencial e linha de corrente em 250 hPa para períodos de início, (e) VIMD para períodos de término, (f) ROL para períodos de término, (g) altura geopotencial e linha de corrente em 850 hPa para períodos de término, (h) altura geopotencial e linha de corrente em 250 hPa para períodos de término. As hachuras indicam áreas com correlação estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$). No canto superior direito de cada mapa está indicado o número de anos extremos selecionados a partir do limiar $|z| \geq 0,8$ (n). .



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da tendência das métricas da estação chuvosa na América do Sul revela um padrão de reorganização espacialmente diferenciado ao longo do tempo, marcado por áreas com expansão e contração da duração da estação, setores com deslocamento temporal da estação chuvosa e regiões sem tendência estatisticamente robusta para tais métricas. Essa heterogeneidade é coerente com a natureza fragmentada do clima sulamericano, descrita por Grimm (2011) como um mosaico de regimes pluviométricos governados por sistemas atmosféricos distintos e por controles fisiográficos diferenciados. O que certamente está associado à grande extensão continental. O padrão do calendário médio identificado para a estação chuvosa na América do Sul é consistente com os resultados apresentados na literatura regional consolidada: Heinemann et al. (2021), Nieto-Ferreira e Rickenbach, (2011), REBOITA et al. (2023) para o domínio monçônico central; Marengo et al. (2001) e Villar et al. (2009), para a Amazônia; Pinheiro e Oyama, (2013) para a costa norte do Nordeste; e De la Cruz et al. (2025) e Buytaert et al. (2006) para compartimentações andinas.

Os mapas de tendência revelam quatro modalidades distintas de reorganização do regime sazonal: contração, expansão, deslocamento tardio e deslocamento precoce da estação chuvosa. A contração (expansão) da estação chuvosa ocorre quando o início é mais tardio (precoce) e o término, mais precoce (tardio), concomitantemente. O deslocamento tardio ocorre quando ambas as bordas da estação se postergam sem redução expressiva da duração, e, o deslocamento precoce, quando tanto o início quanto o término se antecipam, reposicionando a estação chuvosa para datas mais precoces do ano hidrológico. Essa distinção metodológica é relevante uma vez que a literatura recente tem priorizado a interpretação binária de aumento ou redução da duração da estação chuvosa, deixando em segundo plano a possibilidade de deslocamento temporal de toda a estação úmida. Extensas áreas homogêneas de contração da estação chuvosa entre 1981 e 2021 foram identificadas no sudeste da Bolívia, setor leste da Venezuela e sul do Chile. No sudeste da Bolívia, a contração da estação chuvosa foi igual a 54 dias entre 1981 e 2021. Setores do centro-leste do Brasil e do sudeste da América do Sul também apresentam contração da estação chuvosa, porém, de forma mais heterogênea. A contração da estação chuvosa observada em setores da Amazônia meridional (transição Amazônia–Cerrado) e em pequenos núcleos andinos

peruanos, encontra respaldo nos resultados de S. DEBORTOLI et al. (2015), Leite-Filho, Costa e Fu (2020), Giráldez et al. (2020) e Garcia et al. (2025), que documentaram encurtamento da estação associado à combinação entre forçantes de grande escala e processos de superfície. Setores do norte e do sudeste da América do Sul apresentam vastas áreas com expansão da estação chuvosa, associadas ao aumento do volume da precipitação, que respondem à tendência de aumento da convergência do fluxo de umidade em baixos níveis (COSTA, 2026). Em especial, o setor norte do Peru apresenta forte tendência de expansão da estação chuvosa (aumento médio de ~76 dias no período analisado) e da precipitação (~ 1.777mm).

O deslocamento tardio da estação chuvosa observado de forma mais homogênea em áreas centrais do Brasil, entre o nordeste de Goiás e o sudoeste de Minas Gerais, por sua vez, contrasta parcialmente com os resultados de GARCIA et al. (2025), que analisaram tendências do início, término e duração, mas não classificaram explicitamente o deslocamento temporal da estação chuvosa. Ainda assim, os autores identificaram sinal mais claro de contração entre a Amazônia meridional e o oeste do Brasil Central, embora também tenham reconhecido respostas distintas em outras porções do domínio monçônico, como o nordeste da Bacia Amazônica. A identificação do deslocamento temporal da estação chuvosa implica na reorganização da estação chuvosa ao longo do ano, não refletindo mudança da duração, podendo expressar-se como redistribuição temporal da chuva no ano hidrológico, com consequências para a previsibilidade sazonal e a gestão de recursos hídricos. O deslocamento precoce da estação chuvosa apresenta sinais espacialmente mais homogêneos na faixa equatorial continental, adjacentes a áreas onde foi identificada expansão da estação chuvosa e aumento da precipitação, contribuindo adicionalmente para o aumento do volume precipitado.

Os mecanismos físicos envolvidos na alteração do calendário da estação chuvosa integram mudanças na circulação atmosférica de grande escala e processos regionais. Hofmann et al. (2023) demonstraram que a intensificação e a expansão para oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) têm reduzido a chuva sobre o Cerrado, no início do período úmido, concordando parcialmente com os resultados obtidos aqui, enquanto Leite-Filho, Costa e Fu (2020) mostraram que a perda de cobertura florestal na Amazônia meridional eleva o albedo, reduz o fluxo de calor latente e exige maior convergência de umidade para deflagrar a estação chuvosa. Esses processos operam em escalas distintas, mas convergem no efeito de retardar

o estabelecimento da convecção sazonal. As duas áreas de contração da estação chuvosa analisadas em maior profundidade neste estudo ajudam a ilustrar esses mecanismos. Na Bolívia, o início tardio da estação chuvosa está associado à prevalência de anomalias anticiclônicas em baixos níveis no setor leste do Brasil, padrões atmosféricos desfavoráveis à convergência de umidade. Em períodos de término precoce, anomalias ciclônicas centradas sobre o Atlântico Sul subtropical, na costa do estado do Rio de Janeiro estão associadas a mais difluência do ar sobre a Bolívia. Essa leitura é coerente com a de Raia e Cavalcanti (2008), que associam o início e o término do SMAS ao deslocamento da ASAS, ao fluxo de umidade de norte, ao movimento vertical e à expansão ou redução da Alta da Bolívia, e, cos resultados de Marengo et al. (2004, 2012) e Vera et al. (2006), que destacam o JBN como eixo de transporte de umidade entre a Amazônia, a Bolívia e as latitudes subtropicais. Para a Bolívia, Seiler, Hutjes e Kabat, (2013) reforçam que a chuva de verão depende da atuação conjunta da Baixa do Chaco, da Alta da Bolívia, do JBN e da ZCAS.

No leste do Nordeste, a contração da estação chuvosa, associada ao início tardio está relacionada mais diretamente ao deslocamento anômalo meridional da ZCIT e à variação zonal de anomalias de convecção entre o setor equatorial continental oeste e o leste, formando uma gangorra Amazônia–Nordeste, com anomalias positivas de divergência de umidade e ROL. O término precoce da estação chuvosa, também associado à contração da estação, ocorre em decorrência do deslocamento meridional anômalo da ZCIT para latitudes equatoriais mais ao norte.

O conjunto de evidências analisadas neste estudo situa-se em um contexto mais amplo de transformações projetadas para o ciclo hidrológico sul-americano em períodos futuros. Taguela et al. (2026), com base em dados dos cenários do CMIP6, indicam que, sob aquecimento de 1,5 °C e 2,0 °C, o domínio monçônico da América do Sul tende a enfrentar contração da janela úmida com possibilidade simultânea de aumento da intensidade diária da precipitação. Apesar de considerarmos no presente estudo dados históricos, para séries temporais de 1981 a 2021, os resultados obtidos por TAGUELA et al. (2026) diferem dos obtidos aqui, que indicam aumento do volume precipitado e da duração da estação chuvosa em vastas áreas do norte da América do Sul, associadas a inícios precoces e términos tardios. Por outro lado, em outras áreas, como no centro-sul do continente e centro-leste do Brasil, há a indicação de áreas com contração da estação chuvosa, concordando com os resultados

de Taguela et al. (2026). Os resultados de retração da estação chuvosa ao sul e a nordeste da América do Sul podem estar associados à intensificação das atividades convectivas na região central da América do Sul, em faixa alinhada na direção noroeste-sudeste, tal como apresenta Costa (2026).

Em conclusão, este estudo demonstra que a reorganização da estação chuvosa na América do Sul nas últimas décadas é um processo regionalmente diferenciado que envolve, simultaneamente, áreas com encurtamento significativo da duração da estação chuvosa, setores com deslocamento tardio e precoce, além de regiões onde as mudanças se expressam principalmente no volume precipitado. As condições atmosféricas que alteram as datas de início e término da estação chuvosa diferem segundo a região, combinando a atuação de diferentes sistemas, como a ZCIT, ASAS e SMAS. Esses resultados têm implicações para a previsibilidade sazonal, a modelagem regional e a adaptação às mudanças climáticas, indicando que diagnósticos médios continentais podem ser insuficientes diante da heterogeneidade dos processos físicos envolvidos. Estudos futuros podem avançar nas conclusões obtidas aqui pela incorporação de diferentes produtos de precipitação para teste de robustez, pela identificação dos padrões atmosféricos associados aos dias de alteração da duração da estação chuvosa, pela investigação da contribuição relativa de modos climáticos de teleconexão oceano-atmosfera, e, pela proposição de experimentos numéricos que estabeleçam relações de causalidade entre forçantes atmosféricas e a reorganização sazonal da estação chuvosa na América do Sul identificada no período considerado.

REFERÊNCIAS

BELL, Bill et al. The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 147, n. 741, 2021. DOI: 10.1002/qj.4174.

BOISIER, Juan P. et al. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. **Elementa**, *[S. l.]*, v. 6, 2018. DOI: 10.1525/elementa.328.

BOMBARDI, Rodrigo J.; KINTER, James L.; FRAUENFELD, Oliver W. A global gridded dataset of the characteristics of the rainy and dry seasons. **Bulletin of the American Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 100, n. 7, 2019. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0177.1.

BOMBARDI, Rodrigo J.; PEGION, Kathy V.; KINTER, James L.; CASH, Benjamin A.; ADAMS, Jennifer M. Sub-seasonal predictability of the onset and demise of the rainy season over

monsoonal regions. **Frontiers in Earth Science**, *[S. l.]*, v. 5, 2017. DOI: 10.3389/feart.2017.00014.

BUYTAERT, Wouter; CELLERI, Rolando; WILLEMS, Patrick; BIÈVRE, Bert De; WYSEURE, Guido. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. **Journal of Hydrology**, *[S. l.]*, v. 329, n. 3–4, 2006. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.031.

COSTA, Julio Cezar; PEREIRA, Gabriel; SIQUEIRA, Maria Elisa; DA SILVA CARDOZO, Francielle; DA SILVA, Viviane Valéria. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS PELO CHIRPS PARA O BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, *[S. l.]*, v. 24, 2019. DOI: 10.5380/abclima.v24i0.60237.

DE LA CRUZ, Gustavo; HUERTA, Adrian; ESPINOZA, Jhan Carlo; LAVADO-CASIMIRO, Waldo. Present Variability and Future Change in Onset and Cessation of the Rainy Season Over Peru. **International Journal of Climatology**, *[S. l.]*, v. 45, n. 1, 2025. DOI: 10.1002/joc.8700.

DE SOUZA, Everaldo B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. Intraseasonal and submonthly variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. **Theoretical and Applied Climatology**, *[S. l.]*, v. 81, n. 3–4, 2005. DOI: 10.1007/s00704-004-0081-4.

FERREIRA, Glauber W. S.; REBOITA, Michelle S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, *[S. l.]*, v. 13, n. 6, 2022. DOI: 10.3390/atmos13060873.

FRANCHITO, Sergio H.; RAO, V. Brahmanada; BARBIERI, Paulo R. B.; SANTO, Clovis M. E. Rainy-season duration estimated from OLR versus rain gauge data and the 2001 drought in Southeast Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, *[S. l.]*, v. 47, n. 5, 2008. DOI: 10.1175/2007JAMC1717.1.

FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, *[S. l.]*, v. 2, 2015. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 17, n. 1, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0047:TSAMCA>2.0.CO;2.

GARCIA, Sâmia R.; CALHEIROS, Alan J. P.; KAYANO, Mary T. Revised method to detect the onset and demise dates of the rainy season in the South American Monsoon areas. **Theoretical and Applied Climatology**, *[S. l.]*, v. 126, n. 3–4, 2016. DOI: 10.1007/s00704-015-1599-3.

GARCIA, Sâmia R.; RODRIGUES, Maria A. M.; KAYANO, Mary T.; CALHEIROS, Alan J. P. Trend Analysis of Precipitation in the South American Monsoon System (SAMS) Regions and Identification of Most Intense and Weakest Rainy Seasons. **Meteorology**, *[S. l.]*, v. 4, n. 4, 2025. DOI: 10.3390/meteorology4040026.

GARREAUD, René D.; ALVAREZ-GARRETON, Camila; BARICHIVICH, Jonathan; PABLO BOISIER, Juan; CHRISTIE, Duncan; GALLEGUILLOS, Mauricio; LEQUESNE, Carlos; MCPHEE, James;

ZAMBRANO-BIGIARINI, Mauricio. The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. **Hydrology and Earth System Sciences**, *[S. l.]*, v. 21, n. 12, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-6307-2017.

GARREAUD, René D.; VUILLE, Mathias; COMPAGNUCCI, Rosa; MARENGO, José. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, *[S. l.]*, v. 281, n. 3–4, 2009. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

GIRÁLDEZ, Lucy; SILVA, Yamina; ZUBIETA, Ricardo; SULCA, Juan. Change of the rainfall seasonality over central peruvian andes: Onset, end, duration and its relationship with large-scale atmospheric circulation. **Climate**, *[S. l.]*, v. 8, n. 2, 2020. DOI: 10.3390/cli8020023.

GONZÁLEZ, M.; VERA, C. S.; LIEBMANN, B.; MARENGO, J. A.; KOUSKY, V.; ALLURED, D. The nature of the rainfall onset over central South America. **Atmosfera**, *[S. l.]*, v. 20, n. 4, 2007.

GRIMM, Alice M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, *[S. l.]*, v. 25, n. 4, 2011. DOI: 10.1007/s00477-010-0420-1.

HAYLOCK, Malcolm R. et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 19, n. 8, 2006. DOI: 10.1175/JCLI3695.1.

HEINEMANN, Alexandre Bryan; RAMIREZ-VILLEGAS, Julian; STONE, Luís Fernando; SILVA, Ana Paula Garcia Abreu; DA MATTA, David Henriques; DIAZ, Mario Ernesto Piscoya. The impact of El Niño Southern Oscillation on cropping season rainfall variability across Central Brazil. **International Journal of Climatology**, *[S. l.]*, v. 41, n. S1, 2021. DOI: 10.1002/joc.6684.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 146, n. 730, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803.

HOFMANN, G. S. et al. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, *[S. l.]*, v. 13, n. 1, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-38174-x.

HOREL, John D.; HAHMANN, Andrea N.; GEISLER, John E. An investigation of the Annual Cycle of Convective Activity over the Tropical Americas. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 2, n. 11, 1989. DOI: 10.1175/1520-0442(1989)002<1388:aiotac>2.0.co;2.

HOUNSOU-GBO, G. A.; ARAUJO, M.; BOURLÈS, B.; VELEDA, D.; SERVAIN, J. Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the northeast Brazilian coast. **Advances in Meteorology**, *[S. l.]*, v. 2015, 2015. DOI: 10.1155/2015/902084.

KENDALL, M. G.; STUART, A. The Advanced Theory of Statistics. **The Statistician**, *[S. l.]*, v. 18, n. 2, 1968. DOI: 10.2307/2986781.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, *[S. l.]*, v. 107, n. 9, 1979. DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<1140:FIONB>2.0.CO;2.

KOUSKY, Vernon E. Pentad Outgoing Longwave Radiation Climatology for the South American Sector. **Analysis**, *[S. l.]*, v. 3, n. 12, 1988.

KROEGER, Marie E. et al. Rainforest-to-pasture conversion stimulates soil methanogenesis across the Brazilian Amazon. **ISME Journal**, *[S. l.]*, v. 15, n. 3, 2021. DOI: 10.1038/s41396-020-00804-x.

LEITE-FILHO, Argemiro T.; COSTA, Marcos H.; FU, Rong. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. **International Journal of Climatology**, *[S. l.]*, v. 40, n. 4, 2020. DOI: 10.1002/joc.6335.

LIEBMANN, B.; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 14, n. 22, 2001. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2.

LIEBMANN, Brant; CAMARGO, Suzana J.; SETH, Anji; MARENGO, José A.; CARVALHO, Leila M. V.; ALLURED, Dave; FU, Rong; VERA, Carolina S. Onset and end of the rainy season in South America in observations and the ECHAM 4.5 atmospheric general circulation model. Journal of Climate, [S. l.], v. 20, n. 10, 2007. DOI: 10.1175/JCLI4122.1.

MANN, Henry B. Non-Parametric Test Against Trend. **Econometrica**, *[S. l.]*, v. 13, n. 3, 1945.

MARENGO, J. A. et al. **Recent developments on the South American monsoon system**. **International Journal of Climatology**, 2012. DOI: 10.1002/joc.2254.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V. E.; FILIZOLA, N. P.; WAINER, I. C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 14, n. 5, 2001. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2.

MARENGO, Jose A.; FISCH, Gilberto F.; ALVES, Lincoln M.; SOUSA, Natanael V.; FU, Rong; ZHUANG, Yizhou. Meteorological context of the onset and end of the rainy season in Central Amazonia during the GoAmazon2014/5. **Atmospheric Chemistry and Physics**, *[S. l.]*, v. 17, n. 12, 2017. DOI: 10.5194/acp-17-7671-2017.

MARENGO, Jose A.; SOARES, Wagner R.; SAULO, Celeste; NICOLINI, Matilde. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 17, n. 12, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2.

NIETO-FERREIRA, Rosana; RICKENBACH, Thomas M. Regionality of monsoon onset in South America: A three-stage conceptual model. **International Journal of Climatology**, *[S. l.]*, v. 31, n. 9, 2011. DOI: 10.1002/joc.2161.

NOBRE, Carlos A.; SELLERS, Piers J.; SHUKLA, Jagadish. Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 4, n. 10, 1991. DOI: 10.1175/1520-0442(1991)004<0957:adarcc>2.0.co;2.

PINHEIRO, Urias Andrade; OYAMA, Marcos Daisuke. Rainy season features for the Alcântara Launch Center. **Journal of Aerospace Technology and Management**, *[S. l.]*, v. 5, n. 4, 2013. DOI: 10.5028/jatm.v5i4.266.

QUINTANA, J. M.; ACEITUNO, P. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of south America (Chile): 30-43° S. **Atmosfera**, *[S. l.]*, v. 25, n. 1, 2011.

RAIA, Adma; DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI, Iracema Fonseca. The life cycle of the South American monsoon system. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 21, n. 23, 2008. DOI: 10.1175/2008JCLI2249.1.

RAO, V. B.; DE LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern northeast Brazil. **Journal of Climate**, *[S. l.]*, v. 6, n. 9, 1993. DOI: 10.1175/1520-0442(1993)006<1754:saivor>2.0.co;2.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, *[S. l.]*, v. 42, n. 2, 1990. DOI: 10.1007/BF00868215.

RAUSCHER, Sara A.; SETH, Anji; LIEBMANN, Brant; QIAN, Jian Hua; CAMARGO, Suzana J. Regional climate model-simulated timing and character of seasonal rains in South America. **Monthly Weather Review**, *[S. l.]*, v. 135, n. 7, 2007. DOI: 10.1175/MWR3424.1.

REBOITA, Michelle Simões; FERREIRA, Glauber Willian de Souza; RIBEIRO, João Gabriel Martins; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; RAO, Vadlamudi Brahmananda. South American Monsoon Lifecycle Projected by Statistical Downscaling with CMIP6-GCMs. **Atmosphere**, *[S. l.]*, v. 14, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/atmos14091380.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, Manoel Alonso; ROCHA, Rosmeri Porfírio Da; AMBRIZZI, Tércio. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, *[S. l.]*, v. 25, n. 2, 2010. DOI: 10.1590/s0102-77862010000200004.

S. DEBORTOLI, Nathan; DUBREUIL, Vincent; FUNATSU, Beatriz; DELAHAYE, Florian; DE OLIVEIRA, Carlos Henke; RODRIGUES-FILHO, Saulo; SAITO, Carlos Hiroo; FETTER, Raquel. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). **Climatic Change**, *[S. l.]*, v. 132, n. 2, 2015. DOI: 10.1007/s10584-015-1415-1.

SEILER, Christian; HUTJES, Ronald W. A.; KABAT, Pavel. Climate variability and trends in bolivia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, *[S. l.]*, v. 52, n. 1, 2013. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0105.1.

SEN, Pranab Kumar. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, *[S. l.]*, v. 63, n. 324, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.

SPARACINO, J.; ARGIBAY, D. S.; ESPINDOLA, G. Long-term (35 years) rainy and dry season characterization in semiarid northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, *[S. l.]*, v. 36, n. 3, 2021. DOI: 10.1590/0102-77863630138.

TAGUELA, Thierry N.; RAJI, Ibraheem; AKINSANOLA, Akintomide A.; SINGHAI, Priyanshi; ADEYERI, Oluwafemi E.; WAINWRIGHT, Caroline M.; BARIMALALA, Rondrotiana. Impacts of 1.5°C and 2.0°C Global Warming on the Onset, Cessation, and Length of the Rainy Season in

Global Land Monsoon Regions. **Advances in Atmospheric Sciences**, *[S. l.]*, v. 43, n. 1, 2026. DOI: 10.1007/s00376-025-4386-9.

THEIL, Henri. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. *Em*: [s.l: s.n.]. DOI: 10.1007/978-94-011-2546-8_20.

VERA, Carolina et al. **Toward a unified view of the American monsoon systems**. **Journal of Climate**, 2006. DOI: 10.1175/JCLI3896.1.

VILLAR, Jhan Carlo Espinoza; RONCHAIL, Josyane; GUYOT, Jean Loup; COCHONNEAU, Gerard; NAZIANO, Filizola; LAVADO, Waldo; DE OLIVEIRA, Eurides; POMBOSA, Rodrigo; VAUCHEL, Philippe. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology**, *[S. l.]*, v. 29, n. 11, 2009. DOI: 10.1002/joc.1791.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V. Brahmananda. Tropical Cloudiness over the South Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, *[S. l.]*, v. 55, n. 2, 1977. DOI: 10.2151/jmsj1965.55.2_205.