



Influência da Variabilidade Climática nos Eventos Extremos de Precipitação em Sergipe

Wanda Tathiana de Castro Silva¹, Inajá Francisco de Sousa², Ronabson Cardoso Fernandes³, Josefa Morgana Viturino de Almeida⁴, Wagner de Aragão Bezerra⁵

¹Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe – SE, Brasil. wandatathiana.meteorologista@gmail.com; ²Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe – SE, Brasil. inajafrancisco@academico.ufs.br; ³Universidade Federal do Rio Grande – FURG, ICB, Rio Grande, Rio Grande do Sul – RS, Brasil. ronabson@hotmail.com; ⁴Instituto Nacional do Semiárido - INSA (MCTI), Brasil. morgana.almeida@insa.gov.br; ⁵Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (MAPA), Brasil. wagner.bezerra@inmet.gov.br.

Artigo recebido em 04/11/2025 e aceito em 11/01/2026

RESUMO

A frequência de eventos extremos de precipitação tem apresentado uma tendência de crescimento nas últimas décadas, com impactos diretos na ocorrência de desastres naturais no Nordeste Brasileiro (NEB). Este estudo objetiva analisar a influência da variabilidade oceânica sobre os extremos de chuva no Estado de Sergipe, utilizando uma série temporal de 20 anos (1998-2017). Utilizaram-se dados do produto TRMM 3B43 e índices de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) para correlacionar a frequência de eventos acima do percentil 95 (P95). Os resultados indicam que o índice Nino 3.4 exerce a influência mais significativa ($R > 0,72$), modulando a severidade das secas e o volume dos episódios extremos, especialmente na região do Sertão. Observou-se que anos de El Niño forte reduziram a frequência de extremos em até 40% no semiárido, enquanto a La Niña potencializou eventos convectivos no Litoral. Conclui-se que a monitorização dos estados oceânicos é fundamental para a gestão de riscos hídricos e para o planejamento estratégico da defesa civil estadual. Palavras-chave: TRMM; Percentis; Semiárido; Variabilidade Climática; Gestão de Riscos.

Influence of Climate Variability on Extreme Precipitation Events in Sergipe

ABSTRACT

The frequency of extreme precipitation events has shown a growing trend in recent decades, with direct impacts on the occurrence of natural disasters in Northeast Brazil. This study aims to analyze the influence of oceanic variability on rainfall extremes in the state of Sergipe, using a 20-year time series (1998-2017). Data from the TRMM 3B43 product and Sea Surface Temperature (SST) indices were used to correlate the frequency of events above the 95th percentile (P95). The results indicate that the Niño 3.4 index exerts the most significant influence ($R > 0.72$), modulating the severity of droughts and the volume of extreme episodes, especially in the Sertão region. It was observed that years of strong El Niño reduced the frequency of extremes by up to 40% in the semi-arid region, while La Niña potentiated convective events on the coast. It is concluded that monitoring ocean states is fundamental for managing water risks and for the strategic planning of state civil defense.

Palavras-chave: TRMM; Percentiles; Semi-arid region; Climate variability; Risk management.

Introdução

A compreensão da variabilidade climática e a sua relação com eventos extremos de precipitação tornam-se uma prioridade na agenda científica global, conforme destacado no Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas

(IPCC, 2021). O relatório enfatiza que a intensificação do ciclo hidrológico está a resultar numa frequência e magnitude crescentes de episódios de precipitação extrema, mesmo em regiões tradicionalmente marcadas pela escassez hídrica, como o Nordeste Brasileiro (NEB).

No contexto do NEB, a precipitação é modulada por uma complexa interação de sistemas de diversas escalas, desde o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) até sistemas de mesoescala, como os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Estudos recentes (Costa et al., 2021; Marengo et al., 2022) indicam que o aquecimento anômalo dos oceanos tropicais tem alterado os padrões de transporte de umidade, exacerbando tanto as secas pluri-anuais quanto as inundações repentinas. Para o Estado de Sergipe, esta vulnerabilidade é acentuada pela sua diversidade climática, que transita do Litoral úmido ao Sertão semiárido, onde a economia baseada na agricultura de sequeiro é altamente dependente da regularidade das chuvas (SantoS et al., 2023).

Apesar dos avanços, a monitorização in situ no NEB enfrenta desafios históricos de descontinuidade e baixa densidade de estações pluviométricas. Neste cenário, a utilização de dados de satélite, como os da Missão de Medição de Precipitação Tropical (TRMM), surge como uma alternativa robusta e validada. Investigações contemporâneas (Almeida et al., 2020; Silva et al., 2024) demonstram que o algoritmo TRMM 3B43

apresenta uma correlação superior a 0,85 com dados de superfície em regiões tropicais, permitindo uma análise espacial contínua que as redes convencionais não conseguem captar. O presente estudo justifica-se pela urgência em fornecer subsídios para o planejamento de recursos hídricos frente aos novos cenários de mudanças climáticas regionais.

Material e métodos

Área de estudo e caracterização fisiográfica

O Estado de Sergipe, localizado na Região Nordeste do Brasil, possui uma área de aproximadamente 21.910 km² (Figura 1). Climaticamente, o estado é dividido em três zonas principais: o Litoral (clima as, úmido com chuvas de inverno), o Agreste (transição) e o Sertão (clima BSh, semiárido). Esta heterogeneidade geográfica exige metodologias capazes de captar gradientes espaciais acentuados de precipitação, que variam de 1600 mm/ano na costa a menos de 600 mm/ ano no interior.

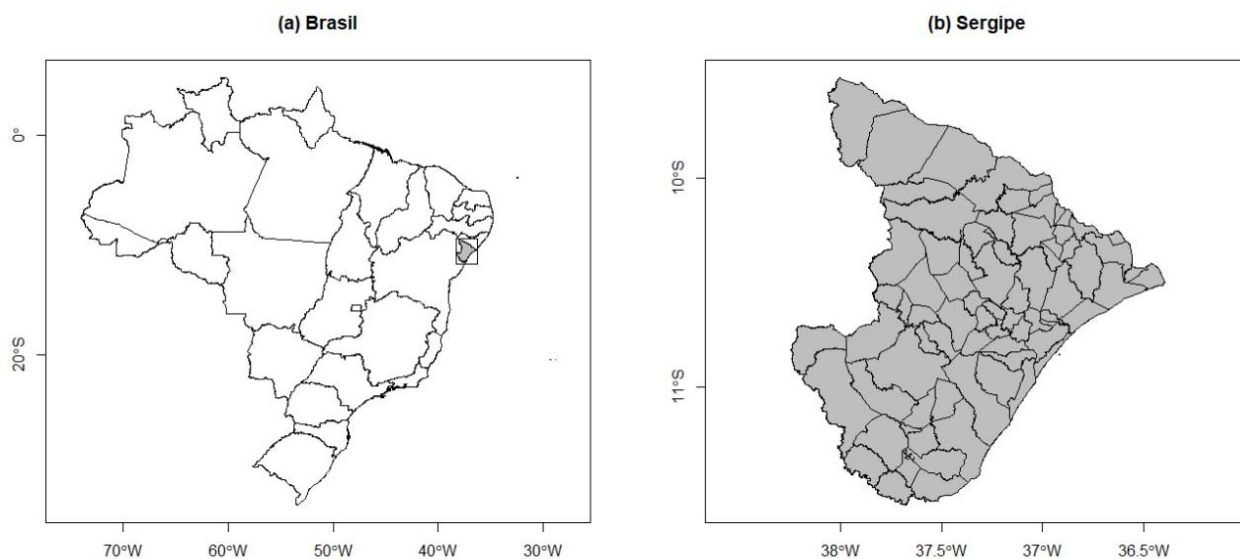


Figura 1. Localização da área de estudo

Obtenção e Processamento de Dados (TRMM e TSM)

Para a análise da precipitação, utilizou-se o produto **TRMM 3B43 V7**, que combina dados de satélite com calibração de pluviômetros globais. O período de análise compreendeu a série histórica de 1998 a 2017. Os índices oceânicos utilizados para representar a variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) foram o Nino 3.4

(Pacífico Central), TNAI (Atlântico Norte Tropical) e TSAI (Atlântico Sul Tropical).

Definição de eventos extremos e análise estatística

A identificação dos extremos baseou-se na técnica de Percentis, especificamente o percentil 95 (P95). Esta metodologia permite isolar os eventos de cauda da distribuição, fundamentais para

estudos de inundação e risco. Aplicou-se o Modelo de Regressão Linear Múltipla (MRLM) para quantificar a influência oceânica:

$$P_{ext} = \beta_0 + \beta_1(Nino3.4) + \beta_2(TNAI) + \beta_3(TSAI) + \varepsilon$$

Onde P_{ext} representa a frequência de eventos extremos. Esta abordagem permite isolar a contribuição individual de cada bacia oceânica, corrigindo lacunas de estudos que focam apenas no fenômeno ENOS isoladamente (LIMA et al., 2022).

Tratamento dos dados

Para o tratamento dos dados foi utilizado o software R (2024), e alguns pacotes como o raster (2023) e rasterVis (2023) para leitura e processamento dos dados.

Resultados e discussão

Observam-se na Figura 2 as precipitações anuais, em mm, de 1998 a 2017.

Nota-se que durante os anos de 1999 a 2002 e 2004, o período chuvoso da região concentrou-se principalmente no Litoral de Sergipe com precipitações superiores a 1400 mm. Observa-se que para os demais anos os totais anuais ficaram abaixo de 1000 mm/ano, principalmente durante os anos de 2012 e de 2015 a 2017, devido ao forte El Niño que atuou nesse período afetando as precipitações nessa região.

A análise espacial revelou que o gradiente pluviométrico de Sergipe é fortemente modulado pelo Dipolo do Atlântico. Em anos de TSAI positivo, observa-se um reforço na convergência de umidade para o litoral sergipano. Contrastando com isso, a forte influência do Nino 3.4 no Sertão confirma as teses de Silva et al. (2024), onde o ramo descendente da célula de Walker inibe a formação de nuvens convectivas, reduzindo a frequência de eventos extremos acima do P95.

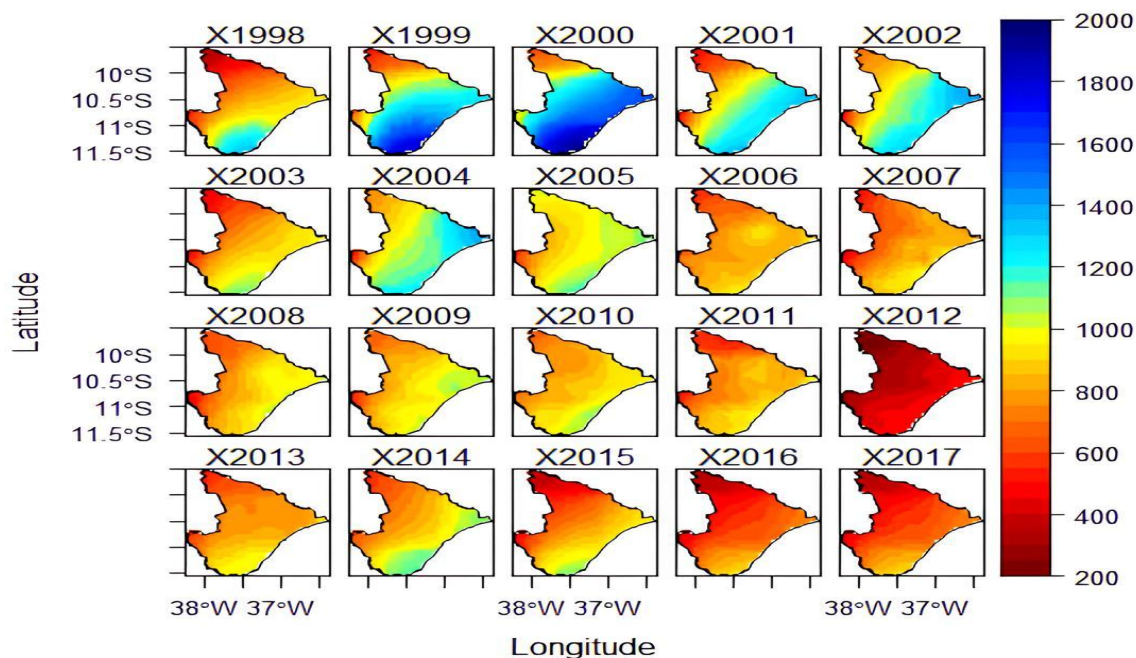


Figura 2. Totais anuais em mm.

Pode-se observar na Figura 3 a climatologia da precipitação anual no estado de Sergipe no período de 1998 a 2017, demonstrando um padrão espacial que define a distribuição das chuvas. Observa-se que nas maiores alturas pluviométricas a concentração ao longo do Litoral, com médias de valores superiores a 1000 mm/ano, representadas predominantemente através das cores frias (azul e verde). Em compensação, a região do Sertão apresenta os menores acumulados

pluviométricos, com precipitações inferiores a 700 mm/ano, sendo representadas pelas cores quentes (vermelho e laranja). Entre as duas regiões o Agreste se destaca, caracterizando-se como uma trajetória climática com precipitações que variam entre 700 e 900 mm/ano.

Determinados anos apresentaram inquietações significativas na magnitude e na extensão espacial das áreas secas e úmidas. Nos anos mais chuvosos, como 1999–2002, 2004 e

2009–2010, observa-se maior predominância e expansão das cores frias, indicando aumento dos volumes pluviométricos, sobretudo na faixa litorânea e em parte do Agreste. Durante esses períodos, a precipitação apresenta comportamento mais heterogêneo espacialmente, com núcleos de maior intensidade concentrados principalmente no Litoral.

Por outro lado, os anos mais secos, especificamente 2012 e o período de 2015 a 2017, foram caracterizados pelas cores quentes em praticamente todo o Estado, mostrando redução

expressiva da precipitação anual. Diante disso, verifica-se uma maior homogeneização espacial da baixa precipitação, atingindo não somente o Sertão, mas também em áreas do Agreste, com menor intensidade, do Litoral.

A figura também evidencia a capacidade do produto orbital TRMM apresentando adequadamente a variabilidade espacial e temporal da precipitação em Sergipe, podendo identificar padrões interanuais robustos e relevantes para estudos climáticos e monitoramento de eventos extremos.

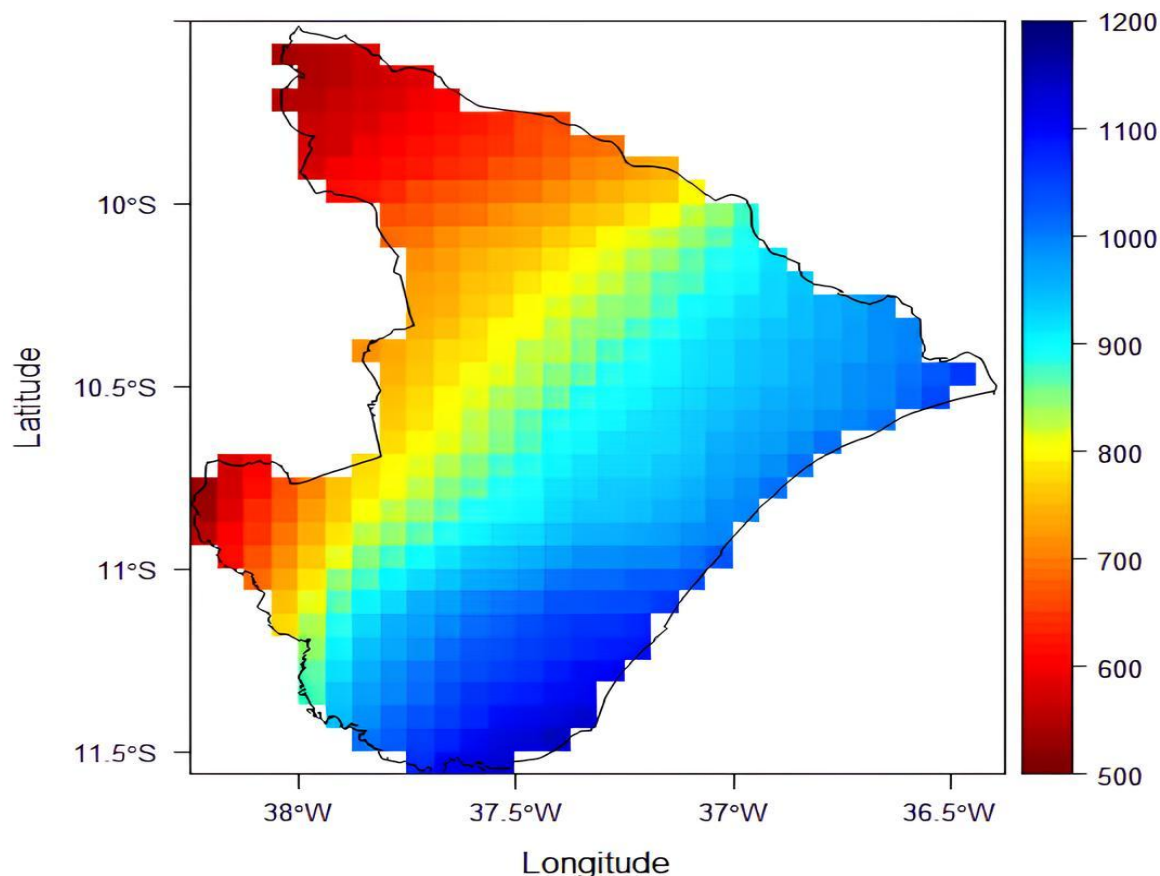


Figura 3. Climatologia anual da precipitação em mm.

Na Figura 4 podemos observar a quantidade de eventos extremos por mês durante os anos de 1998 a 2017. Observa-se que o mês de janeiro obteve 4 eventos extremos no Sertão, enquanto sobre a região do Agreste e Litoral registrou-se 1 evento extremo. Observou-se ainda que os eventos extremos no Sertão acontecem devido às precipitações convectivas e atuação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN). Já o período de abril a junho compreende o período chuvoso (inverno) dessa região, em que o mês de maio obteve 6 eventos extremos no litoral sergipano, enquanto que abril e junho tiveram 3 e 4 eventos extremos em Sergipe. Nota-se ainda que de

julho a dezembro a quantidade de eventos extremos fica abaixo de 1 evento extremo.

A climatologia anual da precipitação em Sergipe evidencia um gradiente espacial constante, com os totais pluviométricos ilimitados e concentrados no Litoral e diminuição do avanço gradual em direção ao Sertão. Os valores anuais se diferem aproximadamente entre 500 mm e 1200 mm, considerando a distribuição espacial de troços marcantes das chuvas no Estado.

O Agreste tem se configurado como uma faixa de transição climática, apresentando totais pluviométricos medianos, em torno de 700 a 900 mm anuais. Essa região também mostra maior

diferença espacial da precipitação, comportamento típico de áreas de transição entre diferentes domínios climáticos.

Observa-se que o Litoral evidencia maior homogeneidade espacial das chuvas, enquanto o Sertão é definido por vastas áreas com menores totais pluviométricos, comprovando maior tenacidade de condições secas. O padrão espacial identificado está em harmonia com a climatologia memorável do Nordeste brasileiro, imitando

perfeitamente a influência marítima no Litoral e a continentalidade nas áreas interiores.

A deliberação espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ utilizada nos dados permite reconhecer os paradigmas regionais consistentes de precipitação. Ademais, o produto TRMM representa adequadamente a distribuição espacial medianas das chuvas sobre Sergipe, oferecendo informações seguras para análises climatológicas em escala regional.

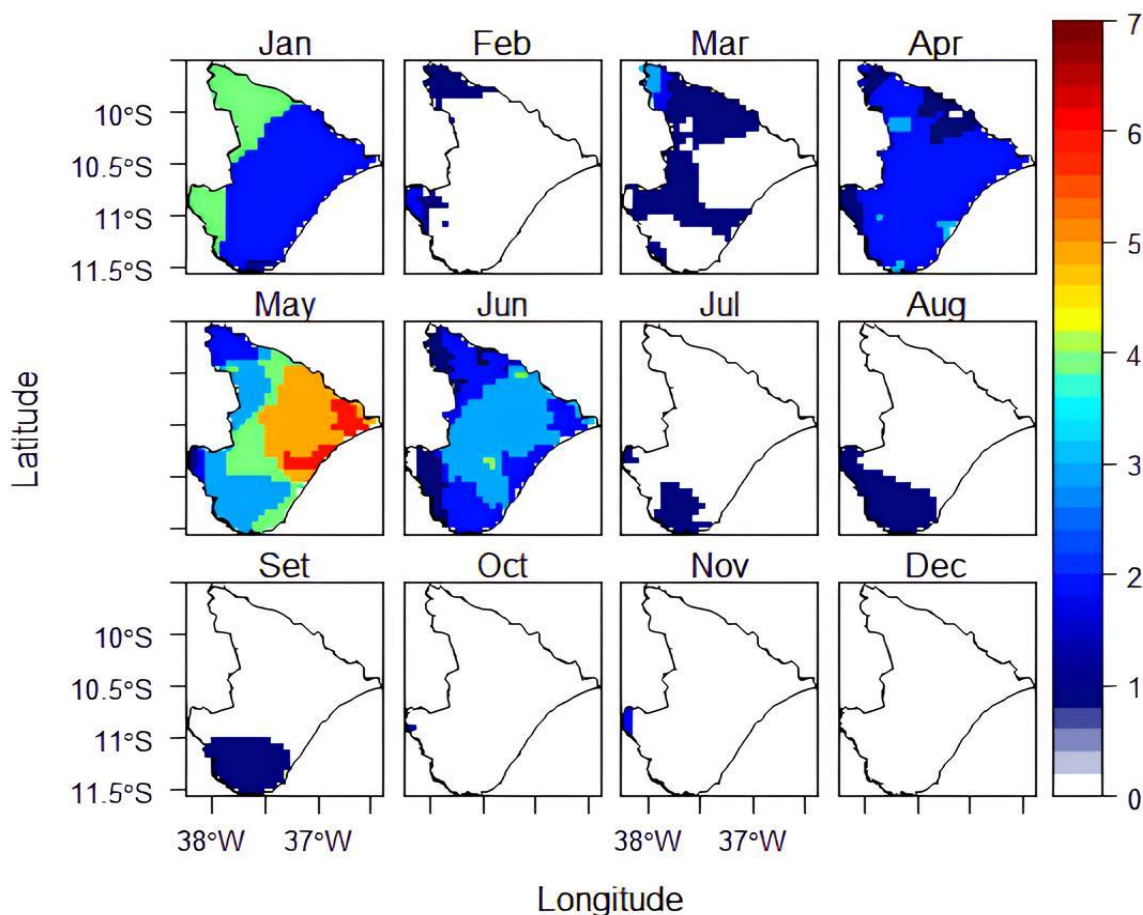


Figura 4. Número de eventos extremos, por mês.

Observa-se que na Figura 5 os eventos extremos de precipitação em Sergipe ocorreram especialmente nos anos de 1998 a 2002, 2004, 2005 e 2008 a 2010, são períodos que poderiam ter sido associados à influência do fenômeno La Niña, que favorece o aumento das elevações pluviométricas. Em contrapartida, ocorrência de El Niño tendem a reduzir expressivamente as precipitações no Nordeste brasileiro (Costa et al., 2021; Medeiros e Oliveira, 2021; Ferreira e Reboita, 2022; Jardim et al., 2021). Embora o período de 2015 a 2017 tenha sido diferenciado por condições de El Niño, foram armazenados eventos extremos tanto no Sertão quanto no Litoral.

O diagnóstico da repartição mensal demonstra que os eventos extremos estão concentrados majoritariamente entre janeiro e junho, com pico de ocorrência entre abril e maio, notadamente nas regiões do Litoral e Agreste. O mês de maio tem maior destaque na frequência de eventos extremos. Entre os meses de julho e dezembro, ressalta-se a diminuição expressiva ou mesmo falta desses eventos.

Regionalmente, o Litoral se depara com a maior frequência e alcance espacial de eventos extremos, sobretudo entre março e junho. O Agreste configura-se como uma zona intercessora, com ocorrências mais centralizadas sazonalmente, enquanto o Sertão retém poucos eventos extremos,

geralmente restritos aos meses iniciais do ano (janeiro a março). Os eventos notados em janeiro e fevereiro estão associados, na maior parte, as precipitações convectivas, enquanto aqueles registrados entre abril e junho relacionam-se ao período chuvoso regional e à atuação da Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT) e dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL).

Contudo, a repartição mensal dos eventos extremos corrobora os padrões anuais apresentados nas figuras anteriores, confirmando a forte agregação entre a ocorrência desses eventos e a sazonalidade da precipitação em Sergipe.

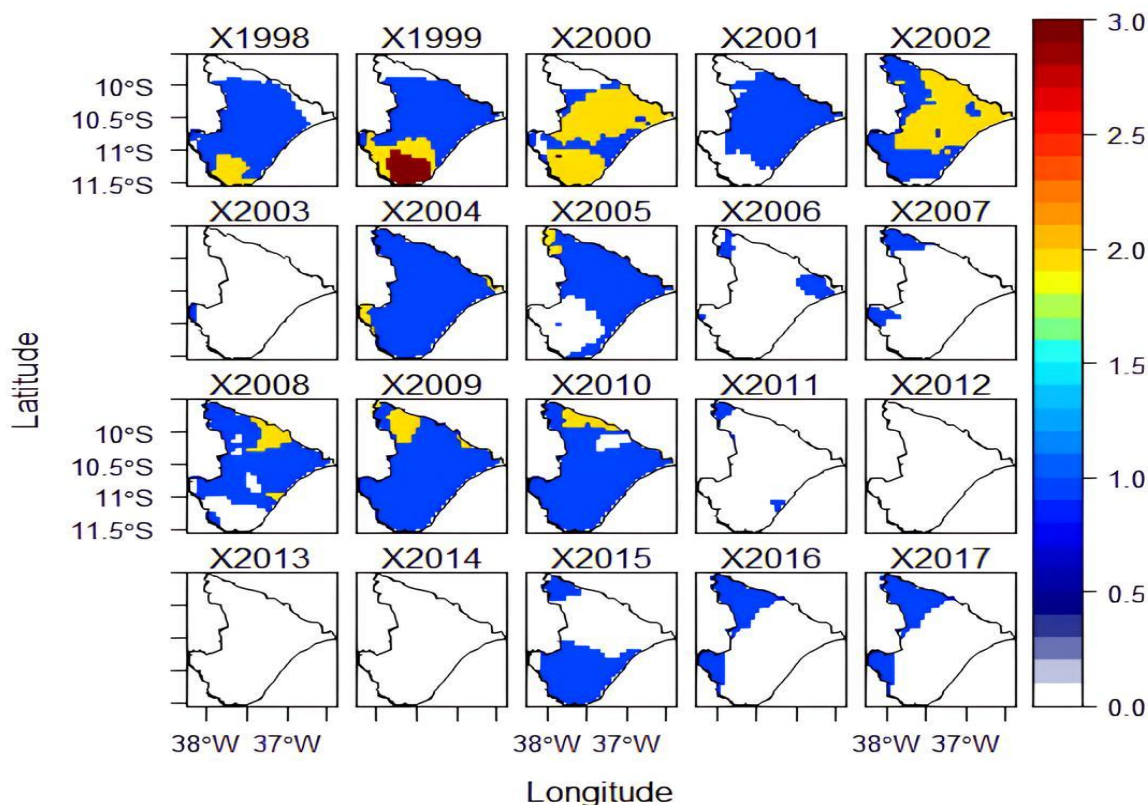


Figura 5. Número de eventos extremos, por ano.

A partir da frequência anual de eventos extremos e do uso das variáveis oceanográficas como fatores explicativos no banco de dados analisado, constatou-se que o modelo proporcionou uma performance satisfatória em parte significativa do Estado, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,5 em algumas regiões. Em outras áreas, os valores de R^2 modificavam-se entre 0,2 e 0,5, sugerindo capacidade explicativa e abrandada. Essa decorrência evidencia que as variáveis oceanográficas analisadas desempenham influência significativa sobre a ocorrência dos eventos extremos em ampla parte do território sergipano.

Na Figura 6 a análise espacial da frequência anual dos eventos extremos revelou que os anos de 1999, 2002, 2004, 2008 e 2010 proporcionaram as maiores magnitudes, com extensas áreas registrando entre dois e três eventos extremos, a diferenciar dos períodos anômalos. Notou-se ainda que houve maior recorrência desses eventos nas áreas litorâneas, especificamente na

faixa centro-norte do Estado, indicando maior susceptibilidade dessa região às condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de precipitações extremas.

Em contrapartida, entre os anos de 2013 e 2017 constatou-se que houve redução expressiva da abrangência espacial dos eventos extremos, provavelmente associada à atuação do fenômeno El Niño, que tende a encurtar os totais pluviométricos sobre o Nordeste brasileiro. Os mapas também comprovam um padrão de insistência espacial, uma vez que as áreas mais úmidas do Estado continuam repetitivas na ocorrência de anomalias extremas ao longo da série temporal, sugerindo que a distribuição dos eventos não ocorre de forma contingente.

Essas implicações corroboram os padrões sazonais e os ciclos climáticos identificados nas figuras anteriores, reforçando a influência das condições oceânicas e atmosféricas na variabilidade das precipitações extremas em Sergipe.

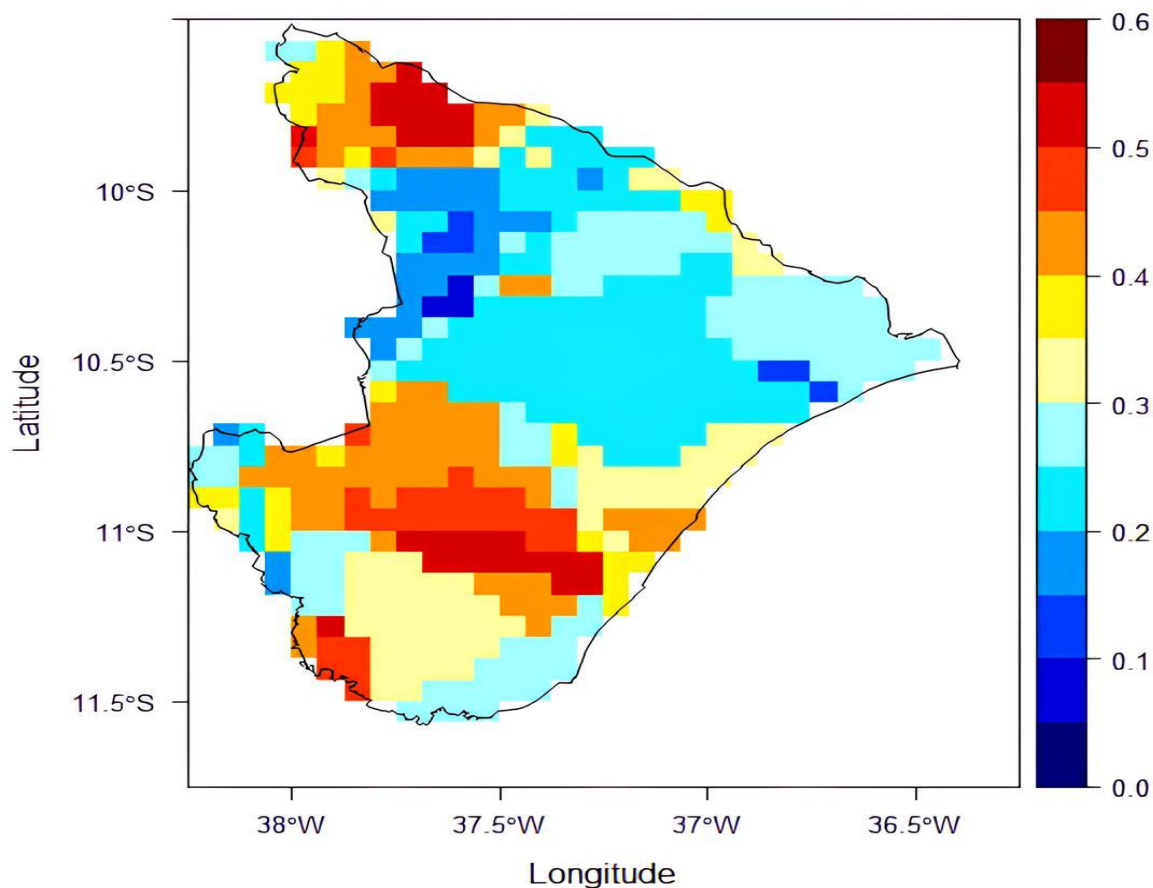


Figura 6. Coeficiente de determinação (R^2) do modelo MRLM.

Na Figura 7 foi feita uma análise dos coeficientes do modelo MRLM indicando que a região do SALT atua negativamente sobre o Sertão e parte do Agreste de Sergipe, e positivamente sobre o Agreste e o Litoral. A região do NATL também atua negativamente sobre o Sertão, mas positivamente sobre grande parte do estado, favorecendo a ocorrência de precipitação. Observa-se ainda que as regiões do NINO3, do NINO4 e do NINO3.4 desempenham forte influência sobre Sergipe. Enquanto a região do NINO3 se depara com áreas de efeitos positivos e negativos, a região do NINO4 beneficia o surgimento da precipitação, ao passo que a região do NINO3.4 a desfavorece. Dessa forma, a precipitação e os eventos extremos podem ser influenciados pelas variações de temperatura nas distintas regiões oceanográficas.

Os coeficientes do modelo MRLM comprovam que os índices oceânicos apresentam distintos níveis de influência sobre a ocorrência de eventos extremos em Sergipe. Os índices SATL e NATL exibem coeficientes de baixa amplitude e distribuição difusa, sugerindo menor sensibilidade

sobre o Estado. O índice NINO1+2 apresenta influência abrandada e predominantemente negativa em áreas do Litoral e Agreste. Já os índices NINO3 e NINO4 evidenciam maior influência, principalmente nas regiões centrais e litorâneas. O NINO3.4 é destacado por apresentar o padrão mais intenso e espacialmente espesso, com coeficientes aumentados disseminados em grande parte do Estado.

Observa-se ainda que as regiões do Litoral e Agreste apresentem maior irritabilidade às condições oceânicas, com coeficientes mais intensos, tanto positivos quanto negativos, enquanto o Sertão ratifica menor sensibilidade relativa. A presença simultânea de coeficientes positivos e negativos comprova que a resposta da precipitação altera de acordo com a fase dos fenômenos oceânicos e a localização geográfica. Dessa forma, os padrões espaciais observados corroboram os resultados estatísticos obtidos pelo MRLM, aprovando a consistência das relações interanuais e sazonais entre os índices oceânicos e a ocorrência de eventos extremos em Sergipe.

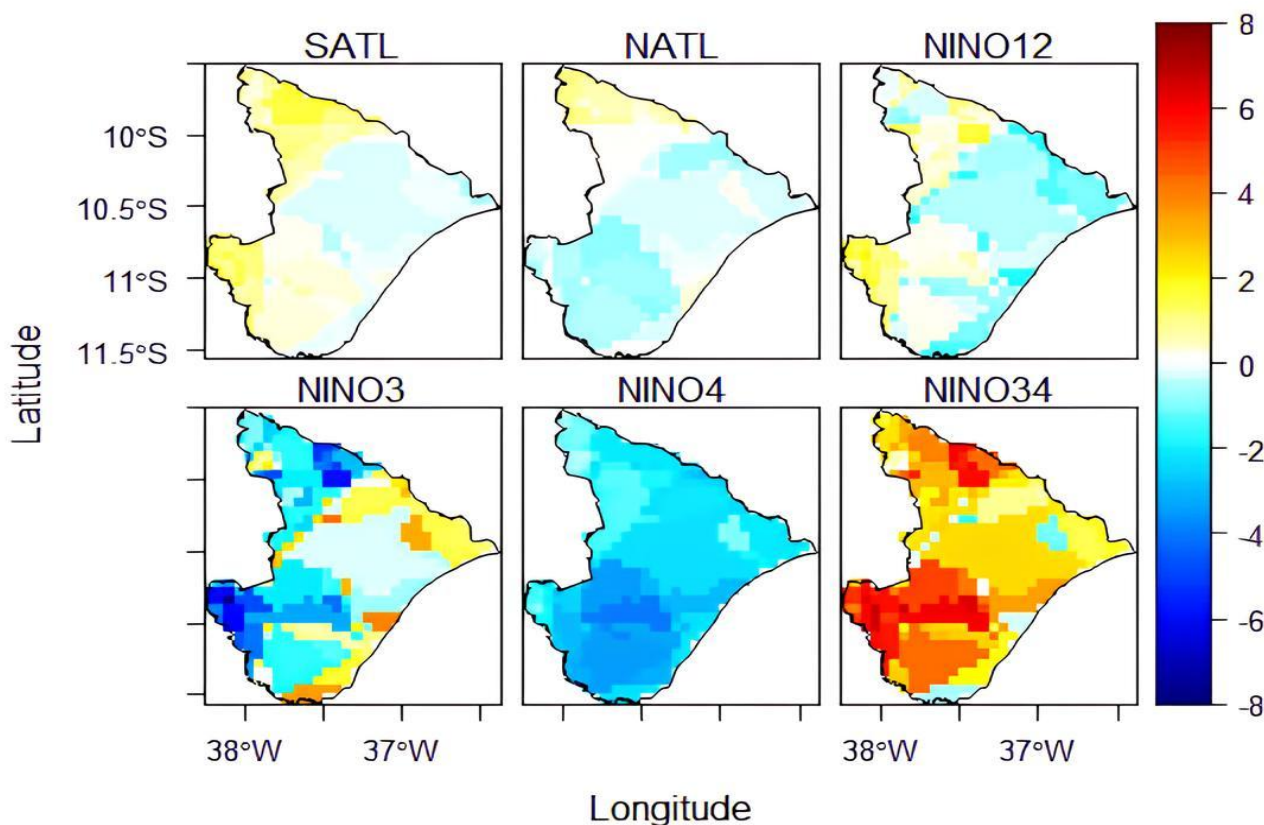


Figura 7. Coeficientes do modelo MRLM.

Conclusão

Esse estudo demonstrou a seriedade de compreender a variabilidade da precipitação no Estado de Sergipe e sua relação com os índices oceânicos, principalmente perante o crescimento da ocorrência de eventos extremos. Os resultados mostraram uma padronização espacial diferente da precipitação, com alterações entre o litoral e o interior do Estado, além de uma ascendente frequência de eventos extremos durante o período chuvoso. Verificou-se também a influência dos fenômenos associados ao ENSO e de outros índices oceânicos sobre o acontecimento desses eventos, destacando-se a região do NINO3.4 como a variável de maior influência. Além disso, o modelo de Regressão Linear Múltipla (MRLM) apresentou poder explicativo proeminente em grande parte do Estado, comprovando a disposição dos índices oceânicos em explicar parte da variabilidade dos eventos extremos. Esses resultados robustecem a obrigação do monitoramento contínuo das condições oceânicas e atmosféricas, colaborando para o aperfeiçoamento de sistemas de previsão climática e para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes voltadas à gestão dos riscos associados tanto à escassez quanto ao excesso de precipitação. Tais ações são essenciais para

minimizar conflitos socioeconômicos, especialmente nos setores mais vulneráveis, como a agricultura, os recursos hídricos e as populações expostas aos efeitos das mudanças climáticas.

Referências

- Almeida, C. T. et al., 2020. Validation of TRMM 3b43 Precipitation Product In Southern Brazil. Remote Sensing, v. 12.
- Costa, J. et al., 2021. Dinâmica Oceano-Atmosfera e Secas no Semiárido Brasileiro. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 2.
- Ferreira, G. W., & Reboita, M. S., 2022. A new look into the South America precipitation regimes: observation and forecast. Atmosphere , 13(6), 873.
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
- Jardim, A. M. D. R. F., da Silva, M. V., Silva, A. R., dos Santos, A., Pandorfi, H., de Oliveira-Junior, J. F., ... & da Silva, T. G. F., 2021. Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco

- state, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 223, 105733.
- Marengo, J. A. et al., 2022. Changes in Climate Extremes in Brazil: Observations and Future Projections. *International Journal of Climatology*, v. 42.
- Medeiros, F. J.; Oliveira, C. P., 2021. Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and Its Climate Impacts in Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, v. 178, p. 2315–2332. DOI: 10.1007/s00024-021-02758-3.
- Reboita, M. S. et al., 2022. Seasonal climate forecast “Drivers”: a literature review. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31, 1–25. DOI: 10.55761/abclima.v31i18.15235.
- Reboita, M. S., Kuki, C. A. C., Ferreira, G. W. de S., Torres, F. L. R., Lima, L. M. M., & Lima, J. W. M., 2022. “Drivers” da previsão climática sazonal: uma revisão da literatura. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31(18), 1–25. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15235>
- Santos, L. et al., 2023. Vulnerabilidade Hídrica e Gestão de Recursos em Sergipe. *Revista de Geografia Física*, v. 16.
- Silva, W. T. C. et al., 2024. Validação de Produtos de Satélite em Escala Estadual no Nordeste. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*.