Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DO AR NO SUL DE MOÇAMBIQUE (1993–2023)

Variability and trends in maximum and minimum air temperatures in southern Mozambique (1993–2023)

Variabilidad y tendencias de las temperaturas máximas y mínimas del aire en el sur de Mozambique (1993–2023)

Raimundo Fred Simbine
Departamento de Recursos Hídricos
Universidade Federal de Lavras (UFLA)
Lavras, Minas Gerais, Brasil
raimundofred@gmail.com

Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi
Departamento de Engenharia Ambiental/DAM
Universidade Federal de Lavras (UFLA)
Lavras, Minas Gerais, Brasil
silvia.yanagi@ufla.br

Olívio Bahia do Sacramento Neto
Instituto Nacional de Meteorologia
Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)
Brasilia, Distrito Federal, Brasil
bahiaolivio@gmail.com

Renato Ribeiro de Lima
Departamento de Estatística
Universidade Federal de Lavras (UFLA)
Lavras, Minas Gerais, Brasil
rrlima@ufla.br

Tadayuki Yanagi Junior
Departamento de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Lavras (UFLA)
Lavras, Minas Gerais, Brasil
yanagi@ufla.br

Michael Silveira Thebaldi
Departamento de Recursos Hídricos
Universidade Federal de Lavras (UFLA)
Lavras, Minas Gerais, Brasil
michael.thebaldi@ufla.br

Resumo: Este estudo avaliou a variabilidade e as tendências anuais e sazonais das temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar em nove estações do sul de Moçambique, com séries de extensões distintas entre 1993 e 2023. As tendências foram identificadas pelo teste de Mann–Kendall e quantificadas pela inclinação de Sen. A correção de Hamed–Rao foi empregada como análise de sensibilidade à autocorrelação, enquanto Pettitt, SNHT e Buishand avaliaram a homogeneidade. Na escala anual, a Tmax aumentou significativamente em Mavalane (+0,503 °C/década), Maputo Observatório (+0,212 °C/década) e Inhambane (+0,155 °C/década), enquanto a Tmin aumentou apenas em Xai-Xai (+0,477 °C/década). Sazonalmente, Mavalane apresentou aumento da Tmax no verão e no inverno, Maputo Observatório apenas no inverno, e Xai-Xai aumento da Tmin em ambas as épocas. O arrefecimento anual e invernal observado em Changalane perdeu significância após a aplicação da correção de Hamed–Rao e coincidiu com sinais de não homogeneidade. Conclui-se que as tendências térmicas são espacial e sazonalmente heterogêneas, reforçando a necessidade de monitoramento local e de interpretação cautelosa das séries sensíveis.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Temperaturas extremas. Teste de Mann-Kendall.

Abstract: This study assessed the annual and seasonal variability and trends of maximum (Tmax) and minimum (Tmin) air temperatures at nine meteorological stations in southern Mozambique, using records of varying lengths spanning 1993–2023. Trends were identified using the Mann–Kendall test and quantified through Sen's slope estimator. The Hamed–Rao correction was applied as a sensitivity analysis for serial autocorrelation, whereas the Pettitt, Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), and Buishand tests were used to assess series homogeneity. At the annual scale, Tmax increased significantly at Mavalane (+0.503 °C decade^{-1}), Maputo Observatory (+0.212 °C decade^{-1}), and Inhambane (+0.155 °C decade^{-1}), whereas Tmin increased significantly only at Xai-Xai (+0.477 °C decade^{-1}). Seasonally, Tmax increased at Mavalane during both austral summer and winter and at Maputo Observatory only during winter, whereas Tmin increased at Xai-Xai in both seasons. The annual and winter cooling signals observed at Changalane lost statistical significance after the Hamed–Rao correction and coincided with evidence of non-homogeneity. The results demonstrate that air-temperature trends are spatially and seasonally heterogeneous, highlighting the need for local-scale monitoring and cautious interpretation of sensitive climate series.

Keywords: Climate change. Extreme temperatures. Mann-Kendall test.

Resumen: Este estudio evaluó la variabilidad y las tendencias anuales y estacionales de las temperaturas máxima (Tmax) y mínima (Tmin) del aire en nueve estaciones meteorológicas del sur de Mozambique, utilizando series de distinta duración comprendidas entre 1993 y 2023. Las tendencias se identificaron mediante la prueba de Mann–Kendall y se cuantificaron mediante la pendiente de Sen. La corrección de Hamed–Rao se aplicó como análisis de sensibilidad frente a la autocorrelación serial, mientras que las pruebas de Pettitt, de homogeneidad normal estándar (SNHT) y de Buishand se utilizaron para evaluar la homogeneidad de las series. A escala anual, la Tmax aumentó significativamente en Mavalane (+0,503 °C década^{-1}), Maputo Observatório (+0,212 °C década^{-1}) e Inhambane (+0,155 °C década^{-1}), mientras que la Tmin aumentó significativamente únicamente en Xai-Xai (+0,477 °C década^{-1}). Estacionalmente, la Tmax aumentó en Mavalane durante el verano y el invierno australes y en Maputo Observatório solamente durante el invierno, mientras que la Tmin aumentó en Xai-Xai en ambas estaciones. Las señales de enfriamiento anual e invernal observadas en Changalane perdieron significación estadística después de la corrección de Hamed–Rao y coincidieron con evidencias de falta de homogeneidad. Los resultados demuestran que las tendencias térmicas son espacial y estacionalmente heterogéneas, lo que refuerza la necesidad de un seguimiento local y de una interpretación cautelosa de las series climáticas sensibles.

Palabras clave: Cambio climático. Temperaturas extremas. Prueba de Mann–Kendall.

Submetido em: 24/01/2026
Aceito para publicação em: 10/08/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm produzido alterações persistentes no regime térmico, expressas tanto na elevação das temperaturas médias como na intensificação de extremos de calor. Entretanto, a magnitude e o sinal dessas alterações não se manifestam uniformemente no espaço, pois a resposta térmica pode variar em função da circulação atmosférica regional, da localização geográfica e das características das séries observacionais. Nesse contexto, a análise separada das temperaturas máxima e mínima do ar é particularmente relevante, uma vez que essas variáveis representam componentes distintos do regime térmico e podem apresentar tendências divergentes ao longo do tempo e entre diferentes localidades (Scholes; Engelbrecht, 2021; Warren *et al*., 2022; Mupangwa *et al*., 2023).

Na África Austral, esse sinal térmico assume particular relevância, uma vez que projeções climáticas indicam aquecimento superior à média global em cenários de altas emissões (Engelbrecht *et al*., 2024). Moçambique encontra-se especialmente exposto aos efeitos dessas alterações devido à sua extensa faixa costeira, à elevada dependência de atividades sensíveis ao clima e à limitada capacidade adaptativa (Mavume *et al*., 2021; Maviza *et al*., 2024). Embora esse contexto justifique o fortalecimento da monitoramento climático (WMO, 2023b), avaliações realizadas em escalas continentais ou nacionais podem ocultar diferenças entre localidades e entre as temperaturas máxima e mínima do ar. Por essa razão, a análise de séries observacionais de estações meteorológicas é necessária para caracterizar como o sinal térmico regional se manifesta no sul do país.

Investigações prévias têm indicado aquecimento persistente na região, embora com intensidade e distribuição espacial desiguais (Scholes; Engelbrecht, 2021; Rouault *et al*., 2024). Na África do Sul, van der Walt e Fitchett (2021) identificaram tendências significativas de aumento de dias e noites quentes entre 1960 e 2016, incluindo elevação média da temperatura máxima do ar de 0,02 °C ano^{-1} e aumento de 0,15% ano^{-1} na frequência de dias quentes. Para o Malawi e a Zâmbia, Demissie e Gebrechorkos (2024) observaram tendências positivas de até 0,6 °C por década nas temperaturas máxima e mínima do ar. Em diferentes localidades da África Austral, Mupangwa *et al*. (2023) também verificaram respostas temporais distintas entre Tmax e Tmin, evidenciando que o sinal regional de aquecimento não se manifesta de maneira uniforme. Ussalu e Bassrei (2021) examinaram a dinâmica térmica no sul de Moçambique, enquanto Fernando (2025) avaliou em escala nacional. Entretanto,

permanecem limitadas as análises atualizadas que comparem sistematicamente as tendências anuais e sazonais de Tmax e Tmin entre diferentes estações.

Apesar dos avanços recentes, lacunas relevantes permanecem na caracterização das tendências térmicas no sul de Moçambique. Grande parte dos estudos disponíveis concentra-se na escala da África Austral ou em outras regiões do país, o que limita a identificação de diferenças entre estações meteorológicas localizadas em contextos geográficos distintos (Engelbrecht *et al*., 2024; Mupangwa *et al*., 2023; Comia *et al*., 2025). Embora Ussalu e Bassrei (2021) tenham analisado a dinâmica climática do sul de Moçambique, ainda são escassas as avaliações que comparem sistematicamente as tendências anuais e sazonais das temperaturas máxima e mínima do ar até 2023. Ademais, a interpretação dessas tendências requer atenção à qualidade e às propriedades estatísticas das séries, uma vez que rupturas de homogeneidade e autocorrelação serial podem afetar a significância dos testes de tendência (Hamed; Rao, 1998; WMO, 2023a). Assim, análises dessa natureza devem considerar não apenas a direção e a magnitude das tendências, mas também a estabilidade estatística dos resultados.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo analisar e quantificar as tendências anuais e sazonais das temperaturas máxima e mínima do ar em nove estações meteorológicas do sul de Moçambique, considerando as séries disponíveis entre 1993 e 2023. Para esse fim, foram aplicados o teste de Mann–Kendall e o estimador de Sen, complementados por diagnósticos de homogeneidade (Pettitt, SNHT e Buishand) e autocorrelação serial, com o propósito de avaliar a robustez estatística das tendências identificadas. Dessa forma, o estudo fornece evidências observacionais atualizadas sobre a direção, a magnitude e a distribuição espacial das alterações térmicas na região, sem atribuir relações causais a fatores que não foram diretamente analisados.

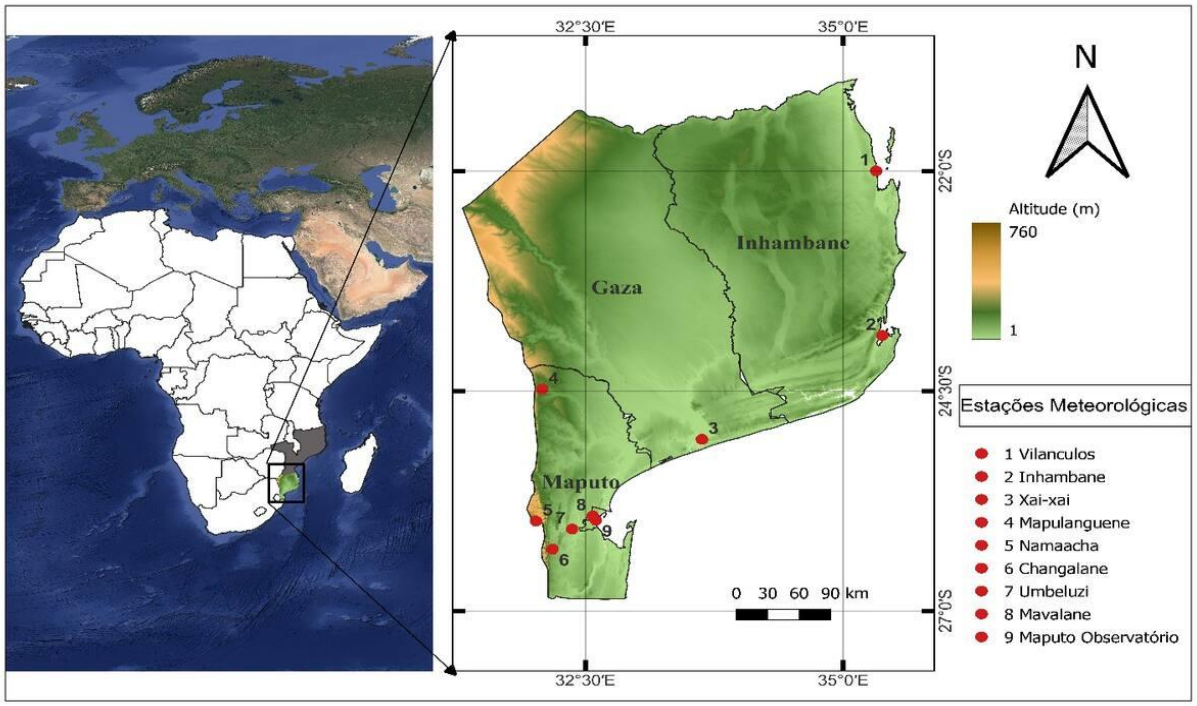
2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Região Sul de Moçambique, constituída pelas províncias de Maputo, Gaza e Inhambane e situada aproximadamente entre as latitudes 21°S e 27°S e as longitudes 31°E e 35°E (Figura 1). A região é atravessada pelo Trópico de Capricórnio e

apresenta contrastes geográficos entre as planícies costeiras, diretamente influenciadas pelo Oceano Índico, e as áreas interiores, caracterizadas por maior continentalidade e ocorrência de condições semiáridas (Uele; Lyra; Oliveira, 2017; Dadá, 2024). Essa diversidade espacial proporciona contextos geográficos distintos para a comparação das séries de temperaturas máxima e mínima do ar.

Figura 1 – Localização da Região Sul de Moçambique e distribuição das nove estações meteorológicas utilizadas no estudo sobre o modelo digital de elevação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O clima da Região Sul de Moçambique é predominantemente classificado como tropical de savana (Aw), com ocorrência de condições semiáridas quentes (BSh) nas áreas interiores das províncias de Gaza e Inhambane (Beck *et al*., 2018; Moçambique, 2023). A sazonalidade climática é marcada por verões quentes e chuvosos, de outubro a março, e por invernos mais amenos e secos, de abril a setembro (Barca; Santos, 1992). As condições térmicas também variam espacialmente, com menores amplitudes sazonais na faixa costeira e maiores amplitudes nas áreas interiores, associadas às diferenças de continentalidade e de influência oceânica (World Bank Group, 2025). A variabilidade climática regional é influenciada pela migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical, pela atuação dos sistemas subtropicais e frontais e pela circulação oceânica no Canal de Moçambique (Tique,

2015; Jury, 2024). Essas características fundamentaram a separação das análises sazonais em verão e inverno.

Do ponto de vista socioeconômico, a Região Sul concentra uma parcela expressiva da população de Moçambique, especialmente na província e na área metropolitana de Maputo (INE, 2019). Nas áreas rurais e costeiras, destacam-se atividades fortemente dependentes das condições climáticas, como a agricultura de sequeiro e a pesca artesanal (Dadá, 2024). A faixa costeira e as zonas úmidas também abrangem ecossistemas ambientalmente sensíveis e áreas reconhecidas por iniciativas de conservação (BirdLife International, 2025). Paralelamente, a região reúne espaços com diferentes níveis de urbanização, desde a área metropolitana de Maputo até localidades predominantemente rurais. Esse contraste socioambiental contribui para contextualizar a distribuição das estações meteorológicas, embora agricultura, cobertura do solo, urbanização e conservação não tenham sido analisadas como variáveis explicativas das tendências térmicas.

2.2. Obtenção e tratamento dos dados

2.2.1. Séries históricas, controle de qualidade e preenchimento de falhas

Neste estudo, foram utilizadas séries observacionais de temperatura mínima (Tmin) e máxima (Tmax) do ar provenientes de nove estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM). O intervalo global de análise compreendeu o período de 1993 a 2023; contudo, a extensão efetivamente disponível variou entre as estações: 1993–2023 para Maputo Observatório, Changalane e Mavalane; 1997–2023 para Inhambane, Namaacha, Vilankulos e Xai-Xai; 1993–2016 para Umbelúzi; e 2005–2023 para Mapulanguene (Tabela 1). Esta última estação foi mantida para ampliar a representatividade espacial da porção interior semiárida da área de estudo, embora os seus resultados tenham sido interpretados com cautela devido à menor extensão temporal. Assim, o estudo analisa tendências nas séries disponíveis e não nas normais climatológicas, cuja padronização pela Organização Meteorológica Mundial se baseia em períodos de 30 anos (WMO, 2023a).

Tabela 1 – Estações meteorológicas utilizadas no estudo, com as respectivas coordenadas geográficas, altitudes, percentual de dados faltantes (falhas) e séries históricas aplicadas.

Estações	Código	Lat.	Long.	Alt (m)	Dist. da costa (km)	Falhas (%)	Período
Inhambane	67323	-23°52’	35°23’	14,0	0,1	21,13	1997 – 2023 (27)
Vilanculos	67315	-22°00’	35°19’	20,0	0,8	14,74	1997 – 2023 (27)
Xai-Xai	67335	-25°03’	33°38’	4,0	10,8	23,36	1997 – 2023 (27)
Mapulanguene	67331	-24°29'	32°05'	149,0	250,0	11,4	2005 – 2023 (19)
Maputo-Obs.	67341	-25°58’	32°36’	60,0	0,6	0,00	1993 – 2023 (31)
Mavalane	67342	-25°55'	32°35'	43,0	30,0	7,26	1993 – 2023 (31)
Changalane	67345	-26°18’	32°11’	100,0	52,7	0,27	1993 – 2023 (31)
Umbeluzi	67347	-26°03’	32°23’	12,0	23,1	2,01	1993 – 2016 (24)
Namaacha	67346	-26°17'	32°11’	547,0	80,0	23,36	1997 – 2023 (27)

Fonte: INAM (2025) - Organizado pelos autores (2025).

Inicialmente, os registros diários foram avaliados quanto à completude antes do cálculo das médias mensais. Um mês foi considerado inválido quando apresentou 11 ou mais dias sem observação ou cinco ou mais dias consecutivos de falhas, conforme os critérios adotados para séries climatológicas (WMO, 2023a). Após as etapas de controle de qualidade e preenchimento descritas adiante, as médias anuais foram calculadas somente para os anos que apresentaram pelo menos dez meses válidos. Para a análise sazonal, foram considerados dois períodos de seis meses: verão, formado por outubro, novembro e dezembro do ano anterior e janeiro, fevereiro e março do ano de referência; e inverno, constituído pelos meses de abril a setembro do mesmo ano. As médias sazonais foram calculadas apenas quando os seis meses do respectivo período apresentaram valores válidos, sendo cada verão identificado pelo ano em que termina.

Antes do preenchimento das falhas, as séries observacionais foram submetidas a controle de qualidade, incluindo a verificação de faixas físicas plausíveis, valores persistentes e possíveis *outliers* por meio de *boxplots* (Yaguchi *et al*., 2016; Bier; Ferraz, 2017). Os valores suspeitos foram conferidos para distinguir possíveis erros de eventos meteorológicos reais, sendo apenas os registros considerados inválidos classificados como ausentes e encaminhados ao procedimento de preenchimento.

O preenchimento das falhas foi realizado separadamente para Tmin e Tmax por regressão linear simples (RLS), utilizando como preditora a estação doadora com maior

correlação de Pearson ($r \geq 0,80$) entre aquelas com registros concomitantes e comportamento climático semelhante (Yaguchi *et al*., 2016; Bier; Ferraz, 2017). Os modelos foram ajustados por período sazonal e avaliados por validação cruzada *leave-one-out*. Foram aceitos apenas os modelos com RMSE ≤ 1,5 °C e viés absoluto ≤ 0,5 °C para Tmax, e RMSE ≤ 1,2 °C e viés absoluto ≤ 0,4 °C para Tmin.

A regressão linear simples (RLS) foi priorizada pela sua transparência, baixa complexidade e adequação a situações em que existe forte associação linear entre as estações-alvo e doadora (Yaguchi *et al*., 2016; Bier; Ferraz, 2017). Contudo, o método pressupõe estabilidade dessa relação ao longo do tempo e pode não representar adequadamente efeitos não lineares, diferenças altimétricas, influência costeira ou relações simultâneas entre várias estações. Abordagens multivariadas, regularizadas ou baseadas em aprendizagem de máquina podem captar estruturas mais complexas, embora exijam maior disponibilidade de preditores e validação independente (Li *et al*., 2023; Alejo-Sanchez *et al*., 2025). Como não foi realizada uma comparação sistemática entre métodos para todas as estações, os valores estimados por RLS foram utilizados somente quando cumpriram os critérios de validação e erro estabelecidos, permanecendo a ausência dessa comparação como limitação metodológica do estudo.

Para Namaacha, as correlações bivariadas com as estações de referência foram inferiores a 0,50, não atingindo o limiar de $r \geq 0,80$ adotado neste estudo para a seleção da estação doadora na RLS (Yaguchi et al., 2016; Bier; Ferraz, 2017). Assim, o preenchimento foi realizado por regressão *ridge* multivariada, combinando simultaneamente as séries de múltiplas estações preditoras e reduzindo a instabilidade dos coeficientes associada à correlação entre elas (Friedman; Hastie; Tibshirani, 2010). Essa abordagem permite obter estimativas mais estáveis quando uma única estação não apresenta capacidade preditiva suficiente (Li *et al*., 2023). Para todos os modelos, os valores preenchidos foram restringidos ao intervalo entre os quantis de 1% e 99% das observações da série-alvo, adotado como critério adicional de controle de plausibilidade, em consonância com as recomendações da WMO (2023a), para procedimentos de controle de qualidade de dados climatológicos. Embora essa restrição reduza estimativas incompatíveis com a distribuição observada, ela pode atenuar eventos extremos e constitui uma limitação do procedimento de preenchimento.

Os valores preenchidos foram identificados quanto à sua origem e ao método de estimação, preservando-se a distinção entre dados observados e estimados. Esse registo permitiu a rastreabilidade do tratamento aplicado às séries utilizadas nas análises subsequentes.

2.2.2. Análise de tendências temporais

As séries anuais e sazonais de Tmin e Tmax foram submetidas a uma sequência de procedimentos destinada à avaliação das tendências, da autocorrelação serial e da homogeneidade das séries. As análises foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2024), adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Inicialmente, a presença de tendências monotônicas foi avaliada pelo teste não paramétrico de Mann–Kendall, adotado como análise principal (Mann, 1945; Kendall, 1975). A hipótese nula estabelece a ausência de tendência monotônica, sendo considerada rejeitada quando $p < 0,05$; valores positivos e negativos da estatística Z indicam, respectivamente, tendência crescente e decrescente. A magnitude da variação foi quantificada pelo estimador de Sen, calculado pela mediana das inclinações entre todos os pares de observações válidas, considerando-se os intervalos reais entre os anos (Sen, 1968). As inclinações foram expressas em graus Celsius por década (°C/década) e apresentadas para todas as séries, enquanto a existência de tendência estatisticamente sustentada foi definida pelo teste de Mann–Kendall.

Como a autocorrelação serial pode alterar a variância do teste de Mann–Kendall e, consequentemente, a significância das tendências, a dependência temporal foi examinada após a remoção da tendência estimada pelo método de Sen (Hamed; Rao, 1998). Nos resíduos detrendidos foram calculadas a função de autocorrelação de primeira ordem (ACF *lag* 1) e a estatística de Ljung–Box para o primeiro *lag* (Ljung; Box, 1978). Considerou-se evidência de autocorrelação quando pelo menos um desses diagnósticos foi significativo ao nível de 5%. Para as séries com observações anuais consecutivas, aplicou-se adicionalmente o teste de Mann–Kendall modificado de Hamed–Rao, com correção da variância considerando os três primeiros *lags*, como análise de sensibilidade (Hamed; Rao, 1998). O Mann–Kendall clássico foi mantido como análise principal; quando a significância permaneceu inalterada após a

correção, o resultado foi classificado como estável, enquanto mudanças na conclusão estatística indicaram sensibilidade à autocorrelação e exigiram interpretação cautelosa.

A homogeneidade das séries foi avaliada pelos testes de Pettitt, de Homogeneidade Normal Padrão (SNHT) e de Buishand, aplicados tanto às séries originais como às séries após a remoção da tendência de Sen (Pettitt, 1979; Alexandersson, 1986; Buishand, 1982). Os resultados obtidos para as séries detrendidas foram adotados como diagnóstico principal, reduzindo o risco de que uma tendência gradual fosse interpretada como uma ruptura abrupta. Considerou-se suspeita de não homogeneidade quando pelo menos dois testes apresentaram $p < 0,05$; quando apenas um teste foi significativo, o resultado foi classificado como sinal isolado, sujeito à verificação dos metadados da estação. Nenhuma série foi corrigida ou homogeneizada automaticamente, e os anos identificados como possíveis pontos de mudança foram utilizados apenas como subsídio à interpretação dos resultados.

Os procedimentos foram executados nos pacotes *trend* (Pohlert, 2023) e *modifiedmk* (Patakamuri e O'Brien, 2021) do ambiente R. Nos testes SNHT e Buishand, os valores de probabilidade foram estimados por 20.000 simulações de Monte Carlo, com semente fixa para assegurar a reprodutibilidade dos resultados. A interpretação foi realizada de forma integrada: o Mann–Kendall clássico permaneceu como análise principal; Hamed–Rao foi utilizado para avaliar a sensibilidade à autocorrelação; e os testes de Pettitt, SNHT e Buishand forneceram diagnósticos de possíveis rupturas nas séries. Assim, a estabilidade frente à autocorrelação e o diagnóstico de homogeneidade foram apresentados separadamente, sendo os casos sinalizados interpretados com cautela nos resultados e na discussão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Tendências anuais: padrões gerais e divergências espaciais

Na Figura 2 estão ilustradas as evoluções das médias anuais das temperaturas máximas do ar (Tmax) e as respectivas linhas de tendência nas nove estações meteorológicas analisadas. A análise estatística não indicou aquecimento generalizado em todas as estações meteorológicas. Um dos principais achados foi a concentração do aquecimento diurno em apenas três localidades, Maputo Observatório, Inhambane e Mavalane, revelando um padrão espacialmente seletivo, em vez de uma resposta térmica regional uniforme. Nessas estações,

as tendências crescentes identificadas pelo teste de Mann–Kendall clássico permaneceram significativas após a aplicação do teste de Hamed–Rao, reforçando a robustez estatística dos resultados. Nas demais estações, as inclinações estimadas para Tmax não apresentaram significância estatística. A análise visual evidencia ainda acentuada variabilidade interanual em torno das tendências de longo prazo; contudo, como os mecanismos atmosféricos e oceânicos não foram diretamente analisados, essas oscilações não foram atribuídas a teleconexões climáticas específicas.

Figura 2 – Temperatura máxima média anual (Tmax, °C) e tendência de Sen (linha tracejada) nas nove estações do sul de Moçambique, conforme as séries disponíveis entre 1993 e 2023.



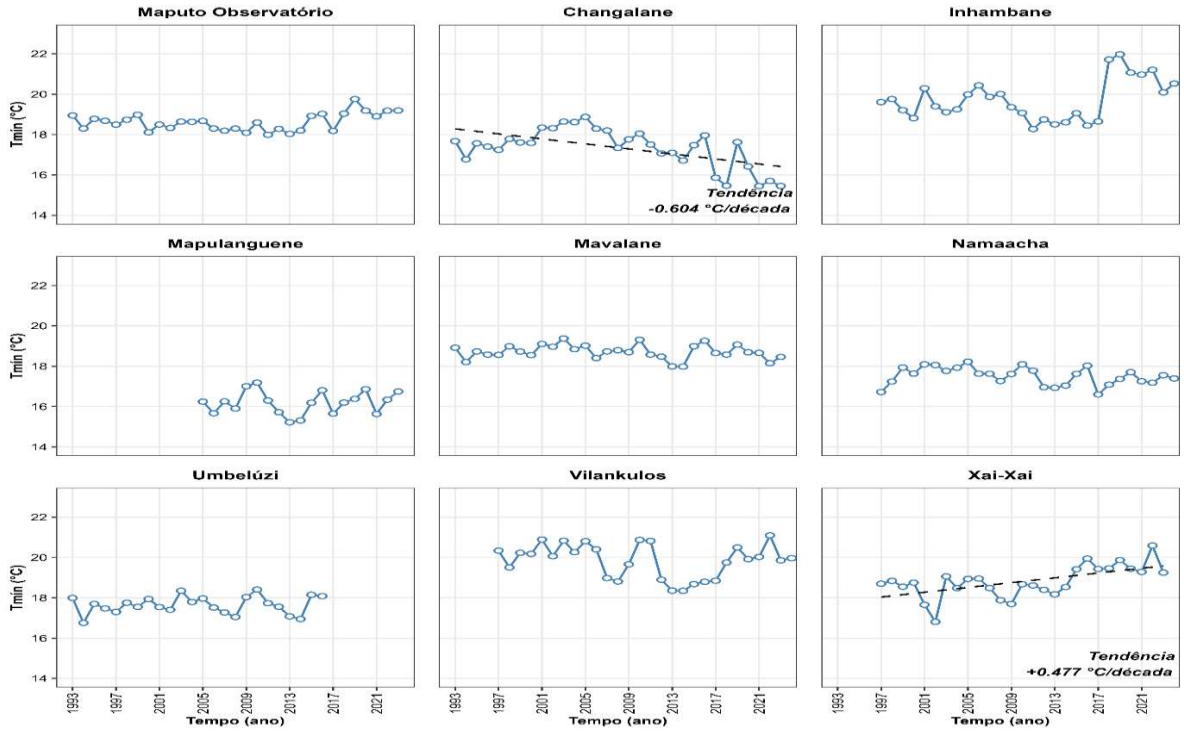
Fonte: INAM (2025) – Elaborado pelos autores (2025)

Na Tabela 2 estão sintetizados os resultados do teste de Mann–Kendall, do estimador de Sen e da análise de sensibilidade de Hamed–Rao. Para Tmax, observaram-se tendências positivas e significativas em Maputo Observatório (+0,212 °C/década), Inhambane (+0,155 °C/década) e Mavalane (+0,503 °C/década). Nestas estações, a significância permaneceu após aplicação da análise de Hamed–Rao, indicando estabilidade na análise de sensibilidade à autocorrelação. Mavalane apresentou a maior magnitude de aquecimento diurno. Nas demais

estações, as inclinações de Tmax não foram estatisticamente significativas, reforçando a heterogeneidade espacial do sinal térmico.

A análise da Tmin média anual (Figura 3) evidencia contrastes espaciais mais pronunciados que os observados para Tmax. Xai-Xai apresentou elevação estatisticamente significativa e robusta, enquanto Changalane exibiu inclinação negativa significativa no Mann–Kendall clássico, mas sensível à correção de Hamed–Rao. Nas demais estações, as tendências não foram significativas. Esse contraste constitui um dos principais achados do estudo, pois evidencia que as temperaturas mínimas não evoluíram uniformemente no sul de Moçambique e que parte dos sinais requer cautela diante da dependência serial.

Figura 3 – Temperatura mínima média anual (Tmin, °C) e tendência de Sen (linha tracejada) nas nove estações do sul de Moçambique, conforme as séries disponíveis entre 1993 e 2023.



Fonte: INAM (2025) – Elaborado pelos autores (2025).

A Tabela 2 confirma a heterogeneidade espacial das tendências anuais de Tmin. Xai-Xai apresentou aumento significativo e robusto de +0,477 °C/década, com p = 0,007 no teste de Mann–Kendall clássico e após a correção de Hamed–Rao, indicando estabilidade da conclusão. Em Changalane, a inclinação de −0,604 °C/década foi significativa no teste clássico (p = 0,004), mas perdeu significância após a correção de Hamed–Rao (p = 0,071),

caracterizando um resultado sensível à autocorrelação serial. Nas demais estações, não foram identificadas tendências significativas de Tmin, e as conclusões permaneceram inalteradas após a análise de Hamed–Rao.

Tabela 2 – Resultados do teste de Mann–Kendall, da análise de sensibilidade de Hamed–Rao e da inclinação de Sen para as temperaturas mínima (Tmin) e máxima (Tmax) no sul de Moçambique (1993–2023).

Estação	Variável	Z (MK)	Valor-p	p (Hamed–Rao)	Robustez	Sen (°C déc.$^{-1}$)
Maputo Obs.	Tmin	0,92	0,358	0,358	Estável (AC)	+0,112
	Tmax	2,62	0,009	0,009	Estável	+0,212
Changalane	Tmin	−2,86	0,004	0,071	Sensível	−0,604
	Tmax	0,37	0,708	0,708	Estável	+0,047
Inhambane	Tmin	0,54	0,588	0,711	Estável (AC)	+0,259
	Tmax	2,04	0,041	0,041	Estável	+0,155
Mapulanguene	Tmin	0,49	0,624	0,624	Estável	+0,096
	Tmax	−0,42	0,675	0,675	Estável	−0,081
Mavalane	Tmin	−0,99	0,324	0,324	Estável	−0,068
	Tmax	4,45	<0,001	<0,001	Estável (AC)	+0,503
Namaacha	Tmin	−1,71	0,087	0,087	Estável	−0,199
	Tmax	0,67	0,505	0,505	Estável	+0,110
Umbelúzi	Tmin	0,52	0,602	0,602	Estável	+0,068
	Tmax	1,69	0,092	0,092	Estável	+0,209
Vilankulos	Tmin	−1,00	0,317	0,464	Estável (AC)	−0,195
	Tmax	0,58	0,559	0,687	Estável (AC)	+0,076
Xai-Xai	Tmin	2,71	0,007	0,007	Estável	+0,477
	Tmax	0,46	0,646	0,646	Estável	+0,024

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Nota: Z (MK): estatística normalizada do teste de Mann–Kendall; p (Hamed–Rao): valor-p após correção da variância para autocorrelação serial. “Estável” indica que a conclusão estatística permaneceu inalterada; “Estável (AC)”, que permaneceu inalterada apesar da autocorrelação; e “Sensível”, que a conclusão mudou após a correção. AC: autocorrelação. Sen: inclinação apresentada para todas as séries, sua interpretação como tendência é condicionada à significância do teste de Mann–Kendall.

Os aumentos de Tmax em Maputo Observatório, Inhambane e Mavalane são coerentes com o aquecimento documentado na África Austral (Engelbrecht *et al*., 2024; Mupangwa *et al*., 2023). Contudo, a ausência de significância nas demais estações mostra que esse sinal regional não se manifesta uniformemente no sul de Moçambique, evidenciando heterogeneidade espacial e exigindo interpretação conforme a robustez de cada série.

Em Maputo Observatório, a Tmax aumentou +0,212 °C/década e permaneceu significativa após aplicação da análise de Hamed–Rao. Isso é compatível com aquecimento em

áreas urbanizadas (Souverijns *et al*., 2022); porém, como urbanização e cobertura do solo não foram analisadas, a associação permanece hipotética.

A estação de Mavalane apresentou a maior taxa de aumento anual de Tmax (+0,503 °C/década; p < 0,001), mantendo a significância após aplicação da análise de Hamed–Rao, apesar da autocorrelação detectada. Esse resultado constitui o sinal mais intenso e robusto de aquecimento diurno entre as estações analisadas. Por situar-se em contexto periurbano e aeroportuário, a tendência é compatível com o armazenamento de calor associado às superfícies construídas e à menor cobertura vegetal (Souverijns *et al*., 2022), além de convergir com evidências de intensificação de calor e extremos térmicos em cidades de Moçambique e da África Austral (Marghidan *et al*., 2023; Mengistu *et al*., 2024). Contudo, como urbanização, impermeabilização, cobertura vegetal e fluxos de calor não foram quantificados, esses fatores constituem hipóteses explicativas plausíveis e não causas demonstradas da tendência.

Em Inhambane, a Tmax aumentou +0,155 °C/década (p = 0,041), mantendo-se significativa após aplicação da análise de Hamed–Rao e sem evidência consistente de autocorrelação ou ruptura, o que reforça a robustez do sinal. Em contraste, Vilankulos apresentou inclinação positiva menor (+0,076 °C/década), não significativa no teste de Mann–Kendall clássico (p = 0,559) e na análise de Hamed–Rao (p = 0,687), apesar da autocorrelação e de um sinal isolado de não homogeneidade. A diferença entre duas estações costeiras indica que a proximidade do Oceano Índico, isoladamente, não explica a distribuição espacial das tendências. A variabilidade térmica e as ondas de calor marinhas no Canal de Moçambique podem influenciar o clima costeiro (Mawren; Hermes; Reason, 2022; Mawren *et al*., 2023; Jury, 2024), mas, como temperatura do mar e circulação atmosférica não foram analisadas, essa relação estabelecida refere-se apenas a uma hipótese explicativa.

Em Mapulanguene, localizada no interior semiárido de Gaza, a Tmax apresentou inclinação de −0,081 °C/década, sem significância no teste de Mann–Kendall clássico (p = 0,675) ou após a correção de Hamed–Rao (p = 0,675). Não foram identificadas autocorrelação nem evidências de não homogeneidade, indicando estabilidade da conclusão estatística. Contudo, a série abrange apenas 2005–2023, período inferior ao das demais estações, o que reduz a capacidade de detectar mudanças graduais. A diferença em relação ao aquecimento regional descrito por Mupangwa et al. (2023) e projetado por Engelbrecht et al. (2024) pode

estar relacionada às distintas escalas espaciais, extensões temporais e naturezas dos dados considerados. Assim, o resultado representa ausência de tendência detectável no período disponível, não evidência de estabilidade climática ou de arrefecimento local. Estudos futuros devem integrar séries mais longas, metadados e informações sobre uso e cobertura do solo para avaliar possíveis mecanismos explicativos.

O comportamento espacialmente heterogêneo da Tmin (Figura 3; Tabela 2) diverge do aquecimento noturno predominante em estudos da África Austral (Mupangwa *et al*., 2023; van der Walt e Fitchett, 2021). Apenas Xai-Xai apresentou aumento significativo e robusto, enquanto o sinal negativo de Changalane foi sensível à autocorrelação. Nas demais estações, as inclinações não foram significativas. Os resultados revelam respostas locais distintas, mas não permitem atribuí-las à urbanização, cobertura vegetal, altitude ou influência marítima, uma vez que estas variáveis não foram analisadas neste estudo.

Em Xai-Xai, a Tmin aumentou +0,477 °C/década ($p = 0,007$), mantendo significância após aplicação da análise de Hamed–Rao e sem evidência de autocorrelação, o que sustenta um sinal robusto de aquecimento noturno. Embora o teste de Buishand tenha indicado sinal isolado de possível ruptura em 2014, Pettitt e SNHT não confirmaram a não homogeneidade, recomendando cautela sem invalidar a tendência. O comportamento é compatível com mecanismos costeiros associados à umidade e aos fluxos de calor do Canal de Moçambique (Mawren; Hermes; Reason, 2022; Mawren *et al*., 2023), apesar de não terem sido analisados neste estudo.

Em Maputo Observatório e Inhambane, as tendências anuais de Tmin não foram significativas no Mann–Kendall clássico ($p = 0,358$ e $p = 0,588$) e permaneceram não significativas após aplicação da análise de Hamed–Rao ($p = 0,358$ e $p = 0,711$). Contudo, ambas as séries apresentaram autocorrelação e suspeita de não homogeneidade, exigindo cautela. Os resultados indicam ausência de tendência monotónica detectável e não comprovação de estabilidade térmica. Essa distinção é relevante porque estudos em Moçambique e na África Austral apontam aumento da frequência ou duração de ondas de calor e noites quentes (Marghidan *et al*., 2023; Jubase; New, 2025), tendência também observada em análises mais amplas sobre o predomínio do aquecimento noturno (Tofu *et al*., 2025).

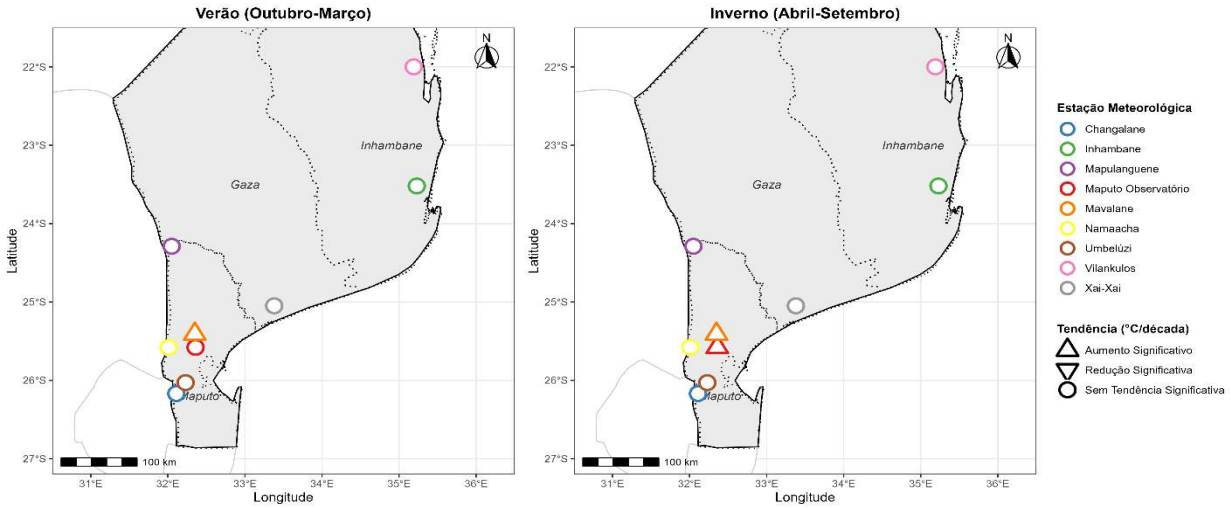
Em Changalane, a Tmin apresentou inclinação de −0,604 °C/década e tendência significativa no Mann–Kendall clássico ($p = 0,004$). Contudo, a significância desapareceu após

a correção de Hamed–Rao (p = 0,071), devido à autocorrelação serial, classificando o resultado como sensível. O teste de Buishand indicou um sinal isolado de possível ruptura em 2000, não confirmado por Pettitt e SNHT. Assim, os dados sugerem redução da Tmin, mas não demonstram de forma robusta um arrefecimento persistente, nem a predominância de forçamentos locais. Alterações no uso do solo, irrigação ou cobertura vegetal poderiam influenciar o balanço energético, porém essas variáveis não foram analisadas e permanecem apenas hipóteses.

3.2. Análise sazonal: sazonalidade do aquecimento e arrefecimento

Na Figura 4 é ilustrado a distribuição espacial das tendências sazonais da temperatura máxima do ar (Tmax). No verão, o aquecimento significativo concentra-se em Mavalane; no inverno, mantém-se nessa estação e ocorre em Maputo Observatório. Esse padrão evidencia heterogeneidade sazonal e espacial, sem permitir atribuir os sinais observados a forçamentos locais não analisados.

Figura 4 – Tendências sazonais da Tmax no sul de Moçambique: verão (esquerda) e inverno (direita). Triângulos indicam tendências significativas (p < 0,05) e círculos, ausência de significância.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A análise sazonal da Tmax (Tabela 3) quantifica os padrões apresentados na Figura 4. Mavalane exibiu aquecimento significativo e robusto no verão (+0,542 °C/década; p < 0,001) e no inverno (+0,529 °C/década; p < 0,001), confirmando a persistência sazonal do sinal. Em

Maputo Observatório, o aumento no verão (+0,237 °C/década) foi significativo no Mann–Kendall clássico (p = 0,0496), mas perdeu significância após aplicação da análise de Hamed–Rao (p = 0,1430), enquanto no inverno o aquecimento permaneceu robusto (+0,263 °C/década; p = 0,0447). Nas demais estações, não foram detectadas tendências significativas em nenhuma das épocas.

Tabela 3 – Tendências sazonais da Tmax: teste de Mann-Kendall e estimador de Sen.

Estação	Verão					Inverno				
	Z	p (MK)	p (HR)	Rob.	Sen	Z	p (MK)	p (HR)	Rob.	Sen
Maputo Obs.	1,96	0,0496	0,1430	S	+0,237	2,01	0,0447	0,0447	E	+0,263
Changalane	0,45	0,6555	0,6555	E	+0,097	0,99	0,3238	0,3238	E	+0,100
Inhambane	1,45	0,1457	0,1457	E	+0,188	1,61	0,1084	0,1084	E	+0,129
Mapulanguene	0,00	1,0000	1,0000	E	+0,022	0,18	0,8611	0,8611	E	+0,037
Mavalane	4,07	<0,001	<0,001	E	+0,542	3,62	<0,001	<0,001	E	+0,529
Namaacha	1,37	0,1718	0,1718	E	+0,473	−0,17	0,8675	0,8675	E	−0,050
Umbelúzi	0,79	0,4282	0,4282	E	+0,231	1,07	0,2859	0,2859	E	+0,120
Vilankulos	0,22	0,8255	0,8970	E (AC)	+0,056	0,33	0,7387	0,7387	E (AC)	+0,035
Xai-Xai	−0,62	0,5371	0,5371	E	−0,132	1,06	0,2873	0,2873	E	+0,129

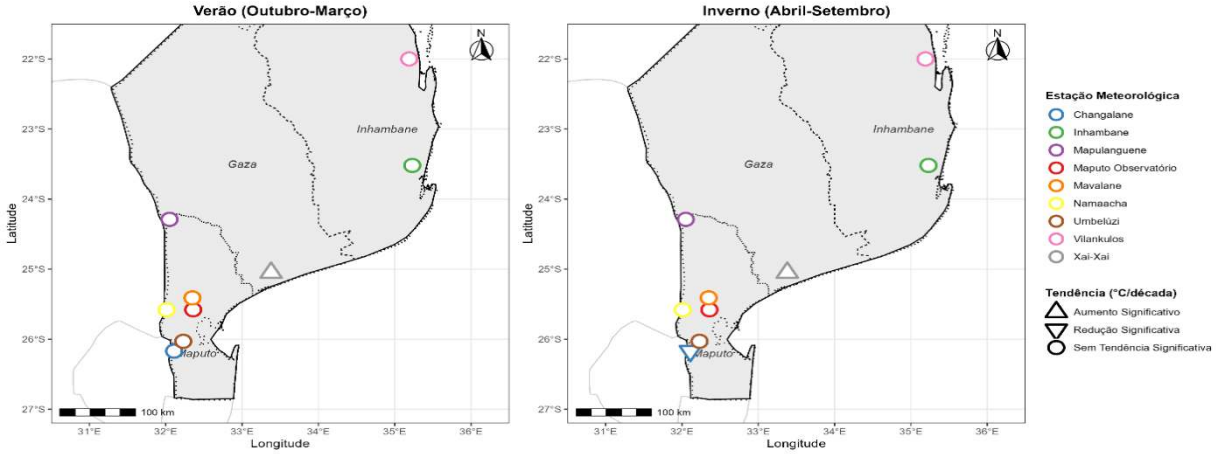
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Nota: Z (MK): estatística normalizada do teste de Mann–Kendall; p (HR): valor-p após a correção de Hamed–Rao; Rob.: Robustez; E: conclusão estável; E (AC): conclusão estável apesar da autocorrelação; S: conclusão sensível à correção; Sen: inclinação em °C/década.

A persistência do aquecimento da Tmax em Mavalane nas duas épocas e a sua ocorrência em Maputo Observatório no inverno integram um padrão de heterogeneidade térmica descrito na África Austral. Jalane *et al*. (2021) relacionam superfícies impermeáveis e menor umidade à redução do fluxo de calor latente, enquanto Marghidan *et al*. (2023) destacam a intensificação do calor em áreas urbanizadas. No inverno, maior estabilidade atmosférica e menor nebulosidade podem favorecer a acumulação de calor próximo à superfície, como discutem Souverijns *et al*. (2022). Em áreas costeiras, Mawren, Hermes e Reason (2022), Mawren *et al*. (2023) e Jury (2024) mostraram que a interação oceano-atmosfera pode modular contrastes térmicos. Contudo, o sinal de Mavalane, embora robusto após aplicação da análise de Hamed–Rao, apresentou no inverno possível ruptura isolada pelo SNHT, recomendando cautela. A ausência de tendências significativas em Vilankulos e Mapulanguene indica apenas que não foi detectada tendência monotónica nos períodos analisados. Assim, esses mecanismos contextualizam a heterogeneidade observada.

Na Figura 5 é ilustrada a distribuição espacial das tendências sazonais da Tmin com base no Mann–Kendall clássico. No verão, o único aumento significativo ocorre em Xai-Xai. No inverno, mantém-se o aquecimento em Xai-Xai e surge uma redução significativa em Changalane; contudo, este último resultado perde significância após aplicação da análise de Hamed–Rao. Assim, o padrão espacial evidencia sinais opostos entre o litoral e o interior, cuja robustez estatística é detalhada na Tabela 4.

Figura 5 – Tendências sazonais da Tmin no sul de Moçambique: verão (esquerda) e inverno (direita). Triângulos indicam tendências significativas (p < 0,05) e círculos, ausência de significância.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A análise sazonal da Tmin (Tabela 4) quantifica os padrões da Figura 5. Xai-Xai apresentou aumentos significativos e robustos no verão (+0,545 °C/década; p = 0,0093) e no inverno (+0,552 °C/década; p = 0,0091), confirmando a persistência sazonal do aquecimento noturno. Em Changalane, a redução no inverno (−0,783 °C/década) foi significativa no Mann–Kendall clássico (p = 0,0013), mas perdeu significância após aplicação da análise de Hamed–Rao (p = 0,0856) e coincidiu com suspeita de não homogeneidade nos três testes (Tabela S2B), sendo classificada como sensível. No verão, não houve tendência significativa. Nas demais estações, não foram detectadas tendências significativas. Portanto, a polarização invernal reúne aquecimento robusto em Xai-Xai e sinal não robusto de arrefecimento em Changalane.

Tabela 4 – Tendências sazonais da Tmin: teste de Mann-Kendall e estimador de Sen.

Estação	Verão					Inverno				
	Z	p (MK)	p (HR)	Rob.	Sen	Z	p (MK)	p (HR)	Rob.	Sen
Maputo Obs.	0,64	0,5204	0,5204	E	+0,071	1,28	0,2022	0,3927	E (AC)	+0,179
Changalane	−1,84	0,0661	0,1602	E	−0,319	−3,21	0,0013	0,0856	S	−0,783
Inhambane	0,97	0,3321	0,4974	E (AC)	+0,368	0,00	1,0000	1,0000	E (AC)	+0,015
Mapulanguene	−1,14	0,2558	0,2558	E	−0,472	1,26	0,2079	0,0547	E	+0,384
Mavalane	−0,07	0,9431	0,9431	E	−0,012	−0,44	0,6584	0,6585	E	−0,044
Namaacha	−1,76	0,0778	0,0778	E	−0,264	−0,33	0,7387	0,7387	E	−0,051
Umbelúzi	0,93	0,3550	0,3551	E	+0,194	0,30	0,7656	0,7656	E	+0,068
Vilankulos	−1,50	0,1339	0,2869	E (AC)	−0,207	−0,54	0,5878	0,5878	E (AC)	−0,113
Xai-Xai	2,60	0,0093	0,0093	E	+0,545	2,61	0,0091	0,0091	E	+0,552

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Nota: Z (MK): estatística normalizada do teste de Mann–Kendall; p (HR): valor-p após a correção de Hamed–Rao; Rob.: Robustez; E: conclusão estável; E (AC): conclusão estável apesar da autocorrelação; S: conclusão sensível à correção; Sen: inclinação em °C/década.

O contraste invernal entre Xai-Xai e Changalane representa sinais estatísticos distintos, mas não mecanismos físicos comprovadamente opostos. Em Xai-Xai, o aquecimento robusto da Tmin é coerente com a modulação costeira descrita por Mawren, Hermes e Reason (2022) e Mawren *et al*. (2023). Jury (2024) destaca a influência do Oceano Índico, enquanto van der Walt e Fitchett (2021) documentam mais noites quentes na África Austral. Contudo, temperatura do mar, umidade e circulação não foram analisadas neste estudo. Em Changalane, a redução invernal diverge do aquecimento regional referido por Scholes e Engelbrecht (2021) e Engelbrecht *et al*. (2024), mas perde significância após aplicação da análise de Hamed–Rao e coincide com suspeita de não homogeneidade. Abbas *et al*. (2024) mostraram que o uso do solo e vegetação podem alterar os fluxos de energia; porém, essas variáveis não foram quantificadas e não explicam o sinal observado.

Os resultados mostram que médias regionais podem ocultar contrastes locais: Mavalane e Xai-Xai apresentam aquecimento robusto, enquanto Changalane exibe arrefecimento sensível e suspeita de não homogeneidade. O IPCC (2023) alerta para esse efeito de agregação. Orcesi *et al*. (2022) defenderam informação climática localizada. Mupangwa *et al*. (2023) e Engelbrecht *et al*. (2024) evidenciaram a desigualdade espacial do aquecimento regional. Assim, o Plano Nacional de Adaptação de Moçambique (2023) pode orientar estratégias territoriais pela robustez dos sinais e pelas limitações das séries.

Em termos aplicados, o aquecimento robusto da Tmax em Mavalane e no inverno em Maputo Observatório justifica reforçar a vigilância do estresse térmico urbano. Marghidan *et al*. (2023) e Jalane *et al*. (2021) destacam esses riscos, enquanto Orcesi, Barros e Boudaud (2022) destacam a necessidade de incorporar as alterações climáticas no planejamento e dimensionamento de infraestruturas. Em Changalane, porém, o arrefecimento invernal é sensível e apresenta suspeita de não homogeneidade, não sustentando recomendações agrícolas. O IPCC (2023) e Engelbrecht *et al*. (2024) reforçaram a ampliação da monitoramento e a integração de metadados antes de definir intervenções.

3.3 Limitações do estudo

As séries analisadas apresentam extensões distintas, variando de 19 a 31 anos, o que limita a comparabilidade entre estações e reduz o poder de detecção de tendências graduais nas séries mais curtas, especialmente em Mapulanguene. Embora o preenchimento das falhas tenha sido submetido à validação e documentado para garantir rastreabilidade, modelos de regressão podem suavizar a variabilidade observada (Li *et al*., 2023). Além disso, a restrição das estimativas aos quantis de 1% e 99% aumenta a plausibilidade dos valores preenchidos, mas pode atenuar ocorrências extremas. Os testes de homogeneidade identificaram suspeitas de rupturas em algumas séries anuais e sazonais, sem que fossem realizadas correções automáticas, devido à ausência de metadados suficientes para confirmar mudanças instrumentais ou operacionais. A correção de Hamed–Rao reduziu o efeito da autocorrelação sobre a significância, mas não elimina as demais fontes de incerteza.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a variabilidade e as tendências anuais e sazonais da Tmax e Tmin em nove estações do sul de Moçambique, com séries de extensões distintas entre 1993 e 2023. A combinação do Mann–Kendall, da inclinação de Sen, da correção de Hamed–Rao e dos testes de homogeneidade mostrou que os sinais térmicos variam espacial e sazonalmente e que sua robustez depende da autocorrelação e da qualidade das séries.

As tendências da Tmax e da Tmin foram espacial e sazonalmente heterogêneas. Na escala anual, a Tmax aumentou significativamente em Mavalane (+0,503 °C/década), Maputo

Observatório (+0,212 °C/década) e Inhambane (+0,155 °C/década), enquanto a Tmin aumentou apenas em Xai-Xai (+0,477 °C/década). Sazonalmente, Mavalane apresentou aumento da Tmax no verão e no inverno, Maputo Observatório apenas no inverno, e Xai-Xai aumento da Tmin em ambas as épocas. O arrefecimento observado em Changalane não se manteve significativo após a correção de Hamed–Rao.

Os contrastes entre Mavalane, Maputo Observatório, Xai-Xai e Changalane confirmam que as tendências térmicas não são espacialmente uniformes. Contudo, os resultados não permitem estabelecer diferenças causais entre urbanização e ruralidade, pois uso do solo, cobertura urbana e processos locais não foram avaliados.

Os resultados sustentam estratégias de adaptação diferenciadas entre as localidades, priorizando o monitoramento do estresse térmico onde o aquecimento foi robusto. A ampliação da rede meteorológica, a recuperação dos metadados e a continuidade das séries são essenciais para confirmar sinais sensíveis e orientar o planejamento climático regional.

REFERÊNCIAS

ABBAS, M.; RIBEIRO, P. F.; SANTOS, J. L. A. A farming system approach to exploring drivers of food insecurity among farm households in developing countries: the case study of Mozambique. **Agronomy**, v. 14, n. 11, art. 2608, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14112608.

ALEJO-SANCHEZ, L. E. et al. Missing data imputation of climate time series: a review. **MethodsX**, v. 15, art. 103455, 2025. DOI: 10.1016/j.mex.2025.103455.

ALEXANDERSSON, H. A homogeneity test applied to precipitation data. **Journal of Climatology**, v. 6, n. 6, p. 661-675, 1986. DOI: 10.1002/joc.3370060607.

BARCA, A. da; SANTOS, T. dos. **Geografia de Moçambique. v. 1: Parte física - 10ª classe.** Maputo: INDE; Editora Escolar, 1992.

BECK, H. E. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, art. 180214, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.214.

BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas em dados meteorológicos para estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215-226, 2017. DOI: 10.1590/0102-77863220008.

BIRDLIFE INTERNATIONAL. **Site factsheets: Important Bird Areas.** 2025. Disponível em: http://datazone.birdlife.org/site/home. Acesso em: 12 ago. 2025.

BUISHAND, T. A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. **Journal of Hydrology**, v. 58, n. 1-2, p. 11-27, 1982. DOI: 10.1016/0022-1694(82)90066-X.

COMIA, H. R. et al. Trend analysis of rainfall and temperature in Metuge district, northern Mozambique. **Discover Atmosphere**, v. 3, art. 8, 2025. DOI: 10.1007/s44292-025-00034-w.

DADÁ, Y. A. Estratégia de produção camponesa em Moçambique: o caso do Sul do Save. **In: IN PROGRESS 3, 2018, Lisboa. Livro das comunicações apresentadas no In Progress 3 com revisão por pares.** Lisboa: ISEG/ULisboa, 2024. p. 69.

DEMISSIE, T.; GEBRECHORKOS, S. H. Spatio-temporal trends in precipitation, temperature, and extremes: a study of Malawi and Zambia (1981-2021). **Sustainability**, v. 16, n. 10, art. 3885, 2024. DOI: 10.3390/su16103885.

ENGELBRECHT, F. A. et al. Projections of future climate change in Southern Africa and the potential for regional tipping points. **In: VON MALTITZ, G. P. et al. (ed.). Sustainability of Southern African ecosystems under global change: science for management and policy interventions.** Cham: Springer, 2024. p. 169-190. DOI: 10.1007/978-3-031-10948-5_7.

FERNANDO, D. M. Z. **Variabilidade temporal e espacial da temperatura do ar e balanço hídrico de Moçambique.** 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2025.

FRIEDMAN, J. H.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent. **Journal of Statistical Software**, v. 33, n. 1, p. 1-22, 2010. DOI: 10.18637/jss.v033.i01.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1-4, p. 182-196, 1998. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00125-X.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE). **IV Recenseamento Geral da População e Habitação 2017: resultados definitivos.** Maputo: INE, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DE MOÇAMBIQUE (INAM). **Séries diárias de temperaturas máxima e mínima do ar das estações meteorológicas do sul de Moçambique.** Maputo: INAM, 2025. Base de dados não publicada.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Core Writing Team: H. Lee; J. Romero (ed.). Geneva: IPCC, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

JALANE, O. I.; SILVA, E. V. da; SOPCHAKI, C. H. Subsistence agriculture and climate change: cases of the districts of Magude and Moamba, south of Mozambique. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 2, p. 123-130, 2021.

JUBASE, P.; NEW, M. The trends in heatwaves and associated synoptic conditions across the upper Limpopo Basin of Botswana and South Africa. **Environmental Development**, v. 55, art. 101211, 2025. DOI: 10.1016/j.envdev.2025.101211.

JURY, M. R. Structure, modulation and impacts of southeastern Africa's diurnal convection. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 6, p. 4851-4862, 2024. DOI: 10.1007/s00704-024-04885-y.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods.** 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.

LI, C.; REN, X.; ZHAO, G. Machine-learning-based imputation method for filling missing values in ground meteorological observation data. **Algorithms**, v. 16, n. 9, art. 422, 2023. DOI: 10.3390/a16090422.

LJUNG, G. M.; BOX, G. E. P. On a measure of lack of fit in time series models. **Biometrika**, v. 65, n. 2, p. 297-303, 1978. DOI: 10.1093/biomet/65.2.297.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945. DOI: 10.2307/1907187.

MARGHIDAN, C. et al. Heatwaves in Mozambique 1983-2016: characteristics, trends and city-level summaries using high-resolution CHIRTS-daily. **Weather and Climate Extremes**, v. 40, art. 100565, 2023. DOI: 10.1016/j.wace.2023.100565.

MAVIZA, G. et al. **Towards a common vision of climate, peace, security and migration in Mozambique.** 2024. Disponível em: https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/climate_peace_migration_mozambique.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

MAVUME, A. F.; BANZE, B. E.; MACIE, O. A.; QUEFACE, A. J. Analysis of climate change projections for Mozambique under the representative concentration pathways. **Atmosphere**, v. 12, n. 5, art. 588, 2021. DOI: 10.3390/atmos12050588.

MAWREN, D.; HERMES, J.; REASON, C. J. C. Marine heatwaves in the Mozambique Channel. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 1-2, p. 305-327, 2022. DOI: 10.1007/s00382-021-05909-3.

MAWREN, D. et al. On the importance of the Mozambique Channel for the climate of southeastern Africa. **Climate Dynamics**, v. 60, n. 1-2, p. 279-299, 2023. DOI: 10.1007/s00382-022-06334-w.

MENGISTU, A. G. et al. Assessing the impact of climate change on future extreme temperature events in major South African cities. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 3, p. 1807-1819, 2024. DOI: 10.1007/s00704-023-04712-w.

MOÇAMBIQUE. MINISTRY OF LAND AND ENVIRONMENT. **Mozambique's National Adaptation Plan.** Maputo: Ministry of Land and Environment, 2023. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/National_Adaptation_Plan_Mozambique.pdf. Acesso em: 13 ago. 2025.

MUPANGWA, W. et al. Temporal changes in minimum and maximum temperatures at selected locations of Southern Africa. **Climate**, v. 11, n. 4, art. 84, 2023. DOI: 10.3390/cli11040084.

ORCESI, A.; BARROS, R.; BOUDAUD, E. Investigating the effects of climate change on structural actions. **Structural Engineering International**, v. 32, n. 4, p. 563-576, 2022. DOI: 10.1080/10168664.2022.2098894.

PATAKAMURI, S. K.; O'BRIEN, N. **modifiedmk: modified versions of Mann Kendall and Spearman's Rho trend tests.** R package version 1.6. [S. l.]: CRAN, 2021. DOI: 10.32614/CRAN.package.modifiedmk.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. DOI: 10.2307/2346729.

POHLERT, T. **trend: non-parametric trend tests and change-point detection.** R package version 1.1.6. [S. l.]: CRAN, 2023. DOI: 10.32614/CRAN.package.trend.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 1 mar. 2025.

ROUAULT, M.; DIEPPOIS, B.; TIM, N.; HÜNICKE, B.; ZORITA, E. Southern Africa climate over the recent decades: description, variability and trends. **In: VON MALTITZ, G. P. et al. (ed.). Sustainability of Southern African ecosystems under global change: science for management and policy interventions.** Cham: Springer, 2024. p. 149-168. DOI: 10.1007/978-3-031-10948-5_6.

SCHOLES, R.; ENGELBRECHT, F. **Climate impacts in Southern Africa during the 21st century.** Johannesburg: Global Change Institute, University of the Witwatersrand, 2021. Report prepared for Earthjustice and the Centre for Environmental Rights.

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

SOUVERIJNS, N. et al. Urban heat in Johannesburg and Ekurhuleni, South Africa: a meter-scale assessment and vulnerability analysis. **Urban Climate**, v. 46, art. 101331, 2022. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101331.

TIQUE, Alexandre Tomo. **Análise da climatologia dinâmica da variabilidade da precipitação na Região Sudeste da África.** 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TOFU, D. A.; WANG, Z.; LIU, Y.; CHEN, X.; JIANG, Z. Global warming amplified regional heatwave with nighttime preeminence outrun daytime heatwave. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 28, art. 100986, 2025. DOI: 10.1016/j.indic.2025.100986.

UELE, D. I.; LYRA, G. B.; OLIVEIRA, J. F. de. Variabilidade espacial e intranual das chuvas na região sul de Moçambique, África Austral. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 473-484, 2017. DOI: 10.1590/0102-77863230013.

USSALU, J. L. M.; BASSREI, A. Climate dynamics of southern region of Mozambique: statistics and Fourier analysis. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 132-156, 2021. DOI: 10.5380/rbclima.v29i0.75088.

VAN DER WALT, A. J.; FITCHETT, J. M. Exploring extreme warm temperature trends in South Africa: 1960-2016. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 143, n. 3-4, p. 1341-1360, 2021. DOI: 10.1007/s00704-020-03479-8.

WARREN, R. et al. Quantifying risks avoided by limiting global warming to 1.5 or 2 °C above pre-industrial levels. **Climatic Change**, v. 172, art. 39, 2022. DOI: 10.1007/s10584-021-03277-9.

WORLD BANK GROUP. **Climate risk country profile: Mozambique.** Washington, DC: World Bank Group, 2025. Disponível em: https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/17258-WB_Mozambique%20Country%20Profile-WEB.pdf. Acesso em: 13 ago. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to climatological practices.** 2023 ed. Geneva: WMO, 2023a. WMO-No. 100.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **State of the climate in Africa 2022.** Geneva: WMO, 2023b. WMO-No. 1330.

YAGUCHI, S. M.; MASSIGNAM, A. M.; RICCE, W. da S.; PANDOLFO, C. Preenchimento de falhas dos dados diários de temperatura máxima e mínima do ar. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1419-1425, 2016. DOI: 10.5902/2179460X19502.

Apêndice S1 – Resultados dos testes de homogeneidade aplicados às séries anuais detrendidas de Tmin e Tmax no sul de Moçambique.

Estação	Variável	Pettitt: p (ano)	SNHT: p (ano)	Buishand: p (ano)	Testes significativos	Diagnóstico
Maputo Obs.	Tmin	0,1045 (2014)	0,0244 (2017)	0,0015 (2014)	2	Suspeita
	Tmax	0,3438 (2016)	0,2805 (1997)	0,0140 (2002)	1	Sinal isolado
Changalane	Tmin	0,2054 (2000)	0,1429 (1997)	<0,0001 (2000)	1	Sinal isolado
	Tmax	1,0000 (2020)	0,8058 (2020)	0,4307 (2014)	0	Sem evidência
Inhambane	Tmin	0,0501 (2017)	0,0027 (2017)	0,0022 (2017)	2	Suspeita
	Tmax	0,6699 (2013)	0,8407 (2013)	0,4849 (2013)	0	Sem evidência
Mapulanguene	Tmin	0,8091 (2011)	0,8325 (2011)	0,6220 (2011)	0	Sem evidência
	Tmax	1,0000 (2019)	0,7295 (2014)	0,1757 (2014)	0	Sem evidência
Mavalane	Tmin	0,8771 (2000)	0,8552 (1997)	0,5486 (2000)	0	Sem evidência
	Tmax	0,2233 (2019)	0,0133 (2019)	0,0534 (2019)	1	Sinal isolado
Namaacha	Tmin	1,0000 (2011)	0,0759 (1998)	0,2796 (1998)	0	Sem evidência
	Tmax	1,0000 (2001)	0,8273 (2001)	0,6313 (2001)	0	Sem evidência
Umbelúzi	Tmin	1,0000 (2014)	0,8557 (2014)	0,9427 (2014)	0	Sem evidência
	Tmax	1,0000 (1998)	0,9988 (2001)	0,9783 (2004)	0	Sem evidência
Vilankulos	Tmin	0,6942 (2006)	0,4396 (2018)	0,0242 (2006)	1	Sinal isolado
	Tmax	0,4176 (2017)	0,3050 (2011)	0,0053 (2011)	1	Sinal isolado
Xai-Xai	Tmin	0,2907 (2014)	0,2358 (2014)	0,0163 (2014)	1	Sinal isolado
	Tmax	0,6228 (2005)	0,6910 (2014)	0,0496 (2014)	1	Sinal isolado

Apêndice S2 – Homogeneidade das séries sazonais detrendidas de Tmin e Tmax no sul de Moçambique.

Estação	Época	Variável	Pettitt: p (ano)	SNHT: p (ano)	Buishand: p (ano)	Testes significativos	Diagnóstico
Maputo Obs.	Verão	Tmin	0,2230 (2018)	0,0669 (2018)	0,0554 (2018)	0	Sem evidência
	Verão	Tmax	0,4710 (2001)	**0,0422 (1995)**	0,0873 (2001)	1	Sinal isolado
	Inverno	Tmin	0,1149 (2014)	0,0588 (2017)	**0,0006 (2014)**	1	Sinal isolado
	Inverno	Tmax	0,7900 (2019)	0,3086 (2019)	0,2172 (2019)	0	Sem evidência
Changalane	Verão	Tmin	0,2430 (2017)	**0,0158 (2017)**	**0,0077 (2017)**	2	Suspeita
	Verão	Tmax	0,8750 (2001)	0,8928 (2001)	0,8377 (2001)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	**0,0370 (2000)**	**0,0176 (2000)**	**<0,0001 (2000)**	3	Suspeita
	Inverno	Tmax	0,8994 (2019)	0,6312 (2019)	0,5393 (2019)	0	Sem evidência
Inhambane	Verão	Tmin	0,2440 (2017)	0,0659 (2018)	**0,0043 (2017)**	1	Sinal isolado
	Verão	Tmax	1,0000 (2017)	0,9084 (2017)	0,9196 (2017)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	**0,0469 (2017)**	**0,0002 (2017)**	**0,0067 (2017)**	3	Suspeita
	Inverno	Tmax	0,7189 (2013)	0,7557 (2013)	0,2169 (2013)	0	Sem evidência
Mapulanguene	Verão	Tmin	0,6482 (2019)	0,3448 (2022)	0,0614 (2019)	0	Sem evidência
	Verão	Tmax	1,0000 (2015)	0,9076 (2006)	0,8143 (2015)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	1,0000 (2014)	0,9294 (2014)	0,7166 (2014)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmax	0,7653 (2019)	0,6307 (2019)	0,1639 (2019)	0	Sem evidência
Mavalane	Verão	Tmin	0,6764 (2011)	0,0640 (2021)	0,2135 (2012)	0	Sem evidência
	Verão	Tmax	0,6764 (2020)	0,1817 (2021)	0,3029 (2020)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	0,8771 (2014)	0,6637 (2014)	0,1520 (2014)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmax	0,3071 (2019)	**0,0366 (2019)**	0,0657 (2019)	1	Sinal isolado
Namaacha	Verão	Tmin	1,0000 (1999)	0,6348 (1999)	0,6109 (2012)	0	Sem evidência
	Verão	Tmax	0,8505 (2000)	0,5830 (2000)	0,2477 (2008)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	0,6228 (2011)	0,3673 (1997)	0,0842 (2011)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmax	1,0000 (2019)	0,9659 (2001)	0,8462 (2004)	0	Sem evidência
Umbelúzi	Verão	Tmin	1,0000 (2012)	0,8243 (2012)	0,9012 (2005)	0	Sem evidência
	Verão	Tmax	0,5303 (2002)	0,5334 (2015)	0,2651 (2002)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	1,0000 (2014)	0,5142 (2014)	0,7328 (2014)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmax	1,0000 (2009)	0,7388 (2009)	0,8305 (2009)	0	Sem evidência
Vilankulos	Verão	Tmin	0,5203 (2007)	0,2539 (2007)	**0,0050 (2007)**	1	Sinal isolado
	Verão	Tmax	0,3306 (2019)	0,2776 (2011)	**0,0032 (2011)**	1	Sinal isolado
	Inverno	Tmin	0,6000 (2017)	0,4652 (2017)	**0,0418 (2017)**	1	Sinal isolado
	Inverno	Tmax	0,1949 (2016)	0,5382 (2016)	**0,0370 (2015)**	1	Sinal isolado
Xai-Xai	Verão	Tmin	0,7943 (2007)	0,8249 (2015)	0,1527 (2015)	0	Sem evidência
	Verão	Tmax	0,7669 (2019)	0,3382 (2019)	0,2359 (2019)	0	Sem evidência
	Inverno	Tmin	0,3999 (2000)	0,3587 (2000)	**0,0134 (2014)**	1	Sinal isolado
	Inverno	Tmax	1,0000 (2005)	0,8047 (1997)	0,5954 (2005)	0	Sem evidência