

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

**VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR E
BALANÇO HÍDRICO DE MOÇAMBIQUE**

Botucatu

2025

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

**VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR E
BALANÇO HÍDRICO DE MOÇAMBIQUE**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Doutor Alexandre Dal Pai

Botucatu

2025

F363v Fernando, Domingos Mário Zeca
Variabilidade temporal e espacial da temperatura do ar e
balanço hídrico de Moçambique / Domingos Mário Zeca
Fernando. -- Botucatu, 2025
101 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Regime pluviométrico. 2. Tendência térmicas. 3.
Balanço hídrico climatológico. 4. Planejamento agrícola.
5. Disponibilidade hídrica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados
fornecidos pelo autor(a).




CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE:

VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR E BALANÇO
HÍDRICO DE MOÇAMBIQUE

AUTOR: DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, pela
Comissão Examinadora:
Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas Unesp
Prof. Dr. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA (Participação Presencial)
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu
Pesquisador Dr. MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA (Participação Presencial)
Tecnologia da Informação / Escola Senai Luiz Massa
Prof.ª Dr.ª VALÉRIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - Unesp
Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - Unesp

Botucatu, 24 de abril de 2025

Dedico este trabalho à Amina Berta
e nossos filhos Otoniel, Quézia e Bezaliel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida, pela minha saúde mental e física...

À minha família pelo apoio e incentivo...

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação e pelo apoio psicológico...

Aos colegas do Laboratório de Agrometeorologia, pelo apoio técnico e científico...

À todas as famílias brasileiras em diferentes cidades e estados, por terem me recebido de uma forma tão maravilhosa...

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP em geral e ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola...

À Universidade Púnguè em Moçambique pela bolsa de estudos concedida...

E aos amigos...

"... quem rega também será regado."

Provérbios 11:25

RESUMO

A compreensão da variabilidade da precipitação e da temperatura, bem como do balanço hídrico em uma localidade específica, é essencial para a gestão hídrica e o planejamento agrícola sustentável. Este estudo analisou a evolução da precipitação acumulada anual, da temperatura média anual e do balanço hídrico climatológico em Moçambique de 1994 a 2023, utilizando dois conjuntos de dados geoespaciais: *ERA5-Land*, do Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF), e o CHIRPS, desenvolvido *pelo Climate Hazards Group*. Procedeu-se ao cálculo dos acumulados anuais da precipitação, da média anual da temperatura, dos desvios padrão anuais e das variabilidades interanuais para cada província, tomando os centroides provinciais como referência espacial. Foi aplicada uma regressão linear para identificar tendências térmicas ao longo das três décadas. O método de *Thornthwaite e Mather (1955)* foi aplicado para estimar a evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR) e quantificar a deficiência (DEF) e o excedente hídrico (EXC). Os resultados obtidos indicam uma redução média de 55 mm (-5,48%) na precipitação anual, afetando principalmente Gaza, Sofala e Niassa, e um aumento médio de 0,6°C na temperatura, mais pronunciado no Sul (+0,6°C) e no centro (+0,5°C). Os anos mais secos foram 2002 e 2015, enquanto 2000 e 2023 registraram os maiores volumes pluviométricos. Os picos térmicos ocorreram em 2019 e 2020, coincidindo com períodos de baixa precipitação. O balanço hídrico demonstra que a precipitação média anual (1004,8 mm) não foi suficiente para compensar a elevada ETP (1208,1 mm), resultando num DEF médio de 424 mm e num EXC de apenas 274,2 mm. O Sul apresentou os maiores déficits hídricos, com Gaza a atingir 565 mm, enquanto a região central, em particular as provinciais de Sofala e Zambézia, registrou um EXC mais elevado (401,9 mm e 443,9 mm, respectivamente), refletindo uma melhor recarga hídrica. No Norte, Cabo Delgado apresentou o maior EXC (539,8 mm), enquanto Nampula e Niassa enfrentaram DEF consideráveis. A intensificação da DEF ao longo das décadas, associada ao aumento da ETP, evidencia a necessidade de estratégias de adaptação para mitigar os impactos da variabilidade climática e garantir a estabilidade hídrica e agrícola. Embora as mudanças observadas sejam inferiores às projeções climáticas globais e regionais, os seus impactos já afetam a segurança hídrica e agrícola do país, tornando urgente a adoção de estratégias de adaptação e gestão sustentável dos recursos hídricos.

Palavra-chave: regime pluviométrico; tendência térmica; balanço hídrico climatológico; planejamento agrícola; disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Understanding the variability of rainfall and temperature, as well as the water balance in a specific location, is a crucial element for water management and agricultural planning. This study investigates the evolution of accumulated annual rainfall, mean annual temperature and climatological water balance in Mozambique between 1994 and 2023, using two geospatial datasets: ERA5-Land, produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), and CHIRPS, developed by the Climate Hazards Group. The annual accumulated rainfall, annual average temperature, annual standard deviations and inter-annual variability were calculated for each province, using the provincial centroids as a spatial reference. Linear regression was applied to identify thermal trends over the three decades. The Thornthwaite and Mather (1955) method was applied to estimate potential evapotranspiration, actual evapotranspiration and quantify water deficiency and water surplus. The results obtained indicate an average reduction of 55 mm (-5.48%) in annual rainfall, mainly affecting Gaza, Sofala and Niassa, and an average increase of 0.6°C in temperature, more pronounced in the south (+0.6°C) and centre (+0.5°C). The driest years were 2002 and 2015, while 2000 and 2023 recorded the highest rainfall volumes. Thermal peaks occurred in 2019 and 2020, coinciding with periods of low rainfall. The water balance shows that the average annual rainfall (1004.8 mm) was not enough to compensate for the high potential evapotranspiration (1208.1 mm), resulting in an average water deficiency of 424 mm and a water surplus of only 274.2 mm. The south showed the biggest water deficits, with Gaza reaching 565 mm, while the central region, in particular the provinces of Sofala and Zambezia, recorded a higher water surplus (401.9 mm and 443.9 mm, respectively), reflecting better water recharge. In the north, Cabo Delgado had the highest water surplus (539.8 mm), while Nampula and Niassa faced considerable water deficiency. The intensification of water deficiency over the decades, associated with the increase in potential evapotranspiration, highlights the need for adaptation strategies to mitigate the impacts of climate variability and guarantee water and agricultural stability. Although the observed changes are lower than global and regional climate projections, their impacts are already affecting the country's water and agricultural security, making it urgent to adopt adaptation strategies and sustainable management of water resources.

Keywords: rainfall patterns; thermal trends; climatological water balance; agricultural planning; water availability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1 - EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS

.....	27
Figura 1 - Localização geográfica de Moçambique com destaque para as províncias e os centroides utilizados na análise climática.....	30
Figura 2 - Variabilidade interanual da precipitação (1994-2023) nas províncias do sul de Moçambique.....	37
Figura 3 - Variabilidade da precipitação (1994-2023) nas províncias do centro de Moçambique.....	39
Figura 4 - Variabilidade da precipitação (1994-20023) nas províncias do norte de Moçambique	41
Figura 5 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023) nas províncias do sul de Moçambique	45
Figura 6 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023) nas províncias do centro de Moçambique	48
Figura 7 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023) nas províncias do norte de Moçambique	51
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS	55
Figura 8 - Localização de Moçambique e localização geográfica dos centroides de cada província.....	58
Figura 9 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região sul de Moçambique (Maputo, Gaza e Inhambane) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação	64
Figura 10 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região centro de Moçambique (Sofala, Manica Zambézia e	

	Tete) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação	67
Figura 11 -	Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região norte de Moçambique (Sofala, Manica Zambézia e Tete) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação	70
Figura 12 -	Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Maputo, Gaza, e Inhambane, - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação; DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico	77
Figura 13 -	Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Sofala, Manica, Tete e Zambézia - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico	81
Figura 14 -	Figura 14 Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Nampula, Niassa e Cabo Delgado - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico	86

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS		27
Tabela 1 -	Dados meteorológicos geoespaciais utilizados no estudo	32
Tabela 2 -	Informações geográficas de centroides de cada província de Moçambique	33
Tabela 3 -	Estatísticas descritivas da precipitação e da temperatura média anual no período entre 1994 e 2023	35
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS		55
Tabela 4 -	Dados meteorológicos geoespaciais utilizados no estudo	59
Tabela 5 -	Informações geográficas de centroides de cada província de Moçambique	60
Tabela 6 -	Variáveis do balanço hídrico acumulados médios anuais em Moçambique (1994 – 2023)	73
Tabela 7 -	Variáveis do balanço hídrico na região sul por década	78
Tabela 8 -	Variáveis do balanço hídrico na região centro por década	83
Tabela 9 -	Variáveis do balanço hídrico na região norte por década	87

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	25
CAPÍTULO 1 - EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS.....	27
1.1 INTRODUÇÃO	30
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	30
1.2.1 Área de Estudo	30
1.2.2 Fonte de Dados	31
1.2.3 Análise Estatística	33
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
1.3.1 Variabilidade da precipitação interanual acumulada em Moçambique ...	36
1.4 CONCLUSÕES	54
1.5 REFERÊNCIAS	55
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS	55
2.1 INTRODUÇÃO	57
2.2 MATERIAL E METODOS	57
2.2.1 Área de Estudo	57
2.2.2 Fonte de Dados Climáticos	59
2.2.3 Cálculo do Balanço Hídrico	60
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
2.3.1 Análise do Balanço hídrico Climatológico anual em Moçambique	63
2.3.2 Análise da variabilidade hídrica decenal em Moçambique	76
2.4 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	92
CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS GERAL	103

INTRODUÇÃO GERAL

Moçambique localiza-se na costa sudeste de África entre latitudes 10°27' e 26°52' sul, e as longitudes 30°12' e 40°51' leste. Com uma área territorial de 799.380 km², o país é banhado pelo Oceano Índico (Hoguane, 2007; INE, 2020; Bento *et al.*, 2023). Cerca de 44% do território moçambicano é planície, maioritariamente na parte sul do Save, apresentando altitudes inferiores a 200m (Dos Muchangos, 1999). O planalto moçambicano é de cerca de 51% com altitudes entre 200 m e 1000 m, observados com maior frequência no Norte e centro do país. Os últimos 5% são constituídos por montanhas de faixas não contínuas, onde o ponto mais alto localiza-se na província de Manica com altitude de 2436m (Dos Muchangos, 1999).

A base de desenvolvimento de Moçambique é a agricultura, mas por ser predominantemente uma agricultura de subsistência e caracterizada por baixos níveis de produção e de produtividade, desafios relacionados ao uso de tecnologia para irrigação, secagem e armazenamento de produtos agrícolas tem sido apontado como fatores preponderantes para mudar o quadro atual do sistema agrícola em Moçambique (Beekman; Veldwisch, 2016; Chichango *et al.*, 2023). Pela localização geográfica de cada província e suas potencialidades agrícolas, estudos sobre análise da precipitação, temperatura do ar e do balanço hídrico, podem contribuir com os desafios dos sistemas agrícolas moçambicanos.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima de Moçambique é caracterizado por uma variação bastante diversificada, influenciada por fatores geográficos e meteorológicos, com a predominância do Oceano Índico (Ferrier; Ruppel, 2025). O interior do sul de Moçambique é classificado como clima árido e semiárido quente (BWh e BSh) enquanto o centro e norte são, predominantemente, classificados como clima subtropical úmido (Cwa e Cwb), com inverno seco (Hoguane, 2007; Ferrier; Ruppel, 2025). A vasta costa do país e uma parte da região norte é dominada pelo clima tropical de savana úmida (Aw) (Hoguane, 2007; Ferrier; Ruppel, 2025). O país apresenta duas estações bem definidas: a estação chuvosa e quente, que se concentra entre novembro e maio, período em que ocorre a maior parte da precipitação anual, com valores aproximados de 1200 mm, e a estação seca e fria, entre abril e outubro (Manhique *et al.*, 2023).

A temperatura média anual apresenta variações latitudinais e topográficas. No sul, as temperaturas médias anuais situam-se em torno dos 23 °C, enquanto no norte,

especialmente nas áreas costeiras, a média anual é de 26 °C. A região centro, que abrange províncias como Sofala, Manica e Zambézia, apresenta uma variação média anual entre 24°C e 25°C, com oscilações influenciadas pela altitude e pela proximidade ao Oceano Índico.

Diante das atuais mudanças climáticas, a compreensão da precipitação e da temperatura, não só de forma global, mas também local, é crucial para vários setores, tendo em conta que estes fatores climáticos influenciam significativamente as condições ambientais, a gestão de recursos e as atividades económicas (Tiwari *et al.*, 2024). A interação entre a temperatura e a precipitação pode determinar a produtividade agrícola, a disponibilidade de recursos hídricos, a saúde do ecossistema e definir padrões para o desenvolvimento de estratégias adaptativas às mudanças climáticas, garantindo a sustentabilidade, (Tiwari *et al.*, 2024; Flanagan, 2024; Jaya *et al.*, 2020).

O exposto anteriormente confere à presente investigação sobre a variabilidade da temperatura e da precipitação em Moçambique uma relevância local no apoio à tomada de decisões. O presente estudo encontra-se estruturado em dois capítulos sucessivos, desenvolvidos de maneira sequencial com o propósito de assegurar a coerência conceitual e a continuidade na abordagem dos objetivos da pesquisa. O primeiro capítulo apresenta uma análise da evolução da precipitação anual acumulada e da temperatura média anual em Moçambique, num período de 30 anos. O segundo capítulo, por sua vez, apresenta uma análise do balanço hídrico climatológico em Moçambique durante o mesmo período de 30 anos.

CAPÍTULO 1

EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS

1.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, especialmente em relação à temperatura e à precipitação, desempenham um papel crucial na agricultura, afetando diretamente a produtividade das culturas (Heino *et al.*, 2020; Lemi, 2019). Nesse contexto, a agricultura se destaca como o setor mais vulnerável às mudanças climáticas, uma vez que suas condições de produção são fortemente influenciadas por essas flutuações (Arora, 2019). Portanto, a compreensão da variabilidade interanual na produção e nos rendimentos agrícolas, em relação às mudanças climáticas, é fundamental para tomada de decisões eficazes no planejamento das atividades agrícolas (Sreenivas *et al.*, 2008; Das; Stigter, 2010).

A temperatura e a precipitação são consideradas variáveis meteorológicas fundamentais para o equilíbrio do sistema climático. A temperatura média anual influencia diretamente os processos fisiológicos das plantas, evaporação, disponibilidade hídrica no solo e ocorrência de ondas de calor (Allen *et al.*, 1998; IPCC, 2021). Já a precipitação constitui o principal mecanismo de recarga hídrica e um fator crítico para a variabilidade da agricultura de sequeiro em regiões tropicais, como é o caso de Moçambique. Mudanças na distribuição e na intensidade das temperaturas médias tende a acentuar a variabilidade pluviométrica, gerando períodos alternados de seca extrema e precipitação concentrada, o que representa um desafio crescente para países em desenvolvimento (Biasutti, 2019; Paredes *et al.*, 2018)

Em diversas regiões semiáridas da África Austral, a precipitação e a temperatura são determinantes cruciais que afetam a prática agrícola, pois alteram significativamente o teor de umidade do solo e a biomassa vegetal, influenciando o desenvolvimento das culturas (Mukhala, 1998; Yang *et al.*, 2023). Portanto, compreender a precipitação e a dinâmica térmica regional é fundamental para otimizar a prática agrícola, identificando os períodos ideais para o plantio e a colheita, bem como as técnicas de manejo agrícola a serem adotadas pelos agricultores (Kalra *et al.*, 2001; Zuma-Netshiukhwi, 2021; Aguilar *et al.*, 2024).

Com base em uma meta-análise conduzida por Cohen *et al.* (2020), foram sintetizados os resultados de mais de 120 estudos de caso, os quais avaliaram a

resposta das culturas agrícolas à combinação de estresse hídrico e ondas de calor, evidenciando os impactos sinérgicos desses fatores na produtividade vegetal.

As conclusões da síntese indicam que a combinação de estresse hídrico e ondas de calor provocam uma diminuição significativa na produtividade agrícola, ao encurtar o ciclo de vida da cultura e ao modificar os atributos da semente, particularmente durante a fase reprodutiva do desenvolvimento da planta (Cohen *et al.*, 2020).

Projeções até 2050, com base no modelo *Global Trade Analysis Project* (GTAP-Dynw), que incorpora zonas agroecônômicas, indicam que a produção agrícola global poderia diminuir até 14% devido a fatores térmicos e hídricos (Kompas *et al.*, 2024). No caso do milho, um dos cereais mais produzidos no mundo, a redução do rendimento e dos componentes do rendimento, sob condições combinadas de estresse hídrico e térmico pode atingir 49% e 86%, dependendo do genótipo (Bheemanahalli *et al.*, 2022).

Os outros cereais de grande valor econômico, como o trigo, o arroz e o café, também sofrem com a combinação de estresse hídrico e térmico, afetando a qualidade das sementes, a fisiologia das plantas, o índice de colheita e a qualidade dos grãos (Hoque *et al.*, 2019; Jha *et al.*, 2022; Yashavanthakumar *et al.*, 2021; Poudel *et al.*, 2024; Salgotra; Chauhan, 2023).

Em Moçambique, o milho é uma das culturas mais importantes para a segurança alimentar e a economia do país. No entanto, dado que mais de 90% da produção provém de pequenos agricultores que dependem de condições de sequeiro, esta prática torna-se extremamente vulnerável às mudanças climáticas (Nhantumbo *et al.*, 2021; Lemi, 2019; Xang *et al.*, 2022).

O desempenho produtivo do milho está fortemente ligado à disponibilidade de água e às condições sazonais, o que destaca a importância de fatores como temperatura e precipitação (Nhantumbo *et al.*, 2021). Embora os dados específicos sobre Moçambique sejam limitados, pesquisas mostram que temperaturas extremas e baixa precipitação podem reduzir significativamente o rendimento do milho (Bradshaw *et al.*, 2022).

No norte da China, temperaturas elevadas e condições secas prejudicam significativamente as taxas de enchimento dos grãos e os rendimentos produtivos, enquanto uma revisão sistemática da agricultura brasileira destaca a temperatura e a precipitação como fatores climáticos fundamentais que influenciam a produção de

alimentos, com o milho a ser amplamente estudado (Qi *et al.*, 2022; Fiorini *et al.*, 2024).

Na Etiópia, dinâmicas semelhantes explicam uma variabilidade substancial na produção de milho, com as chuvas do período de crescimento associadas positivamente à produção (Abdisa *et al.*, 2022). No noroeste da África do Sul, a seca e as chuvas extremas explicam conjuntamente 46% da variabilidade da produção de milho (Simanjuntak *et al.*, 2023).

As interações complexas entre fatores genéticos e ambientais tornam-se determinantes na produtividade de culturas, sendo estimada que 60% da variabilidade no rendimento esteja associada ao potencial genético das cultivares e 40% às condições edafoclimáticas e ao manejo agrícola (Resende *et al.*, 2003). Por isso, ao avaliar a produtividade, é fundamental relacionar o potencial genético produtivo das sementes e à disponibilidade hídrica, à fertilidade do solo e as práticas agrônômicas, como a adubação, o espaçamento e o controle de pragas e doenças (Bárbaro *et al.*, 2008). Relativamente a variações climáticas, a questão da precipitação e das temperaturas são elementos que limitam significativamente a produtividade, especialmente em regiões com elevada variabilidade interanual.

Elementos meteorológicos, como temperaturas extremas e baixa precipitação, estão frequentemente associados a anomalias climáticas, como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO), que afeta o clima em várias regiões do mundo, incluindo Moçambique (Matarira, 1990; Goss, 2022).

O fenômeno El Niño está relacionado ao aquecimento anômalo das águas do Pacífico equatorial e tende a provocar condições de seca no sul da África, enquanto o La Niña geralmente resulta em chuvas acima da média (Dieppois *et al.*, 2015; Hoell *et al.*, 2018).

Em países da África Austral, os eventos do El Niño foram associados a reduções significativas na produção de milho devido às condições de seca, com a África do Sul e o Zimbábue a apresentarem uma forte correlação entre as fases do ENSO e as anomalias de produção (Cook *et al.*, 2023; Mugiyo *et al.*, 2023).

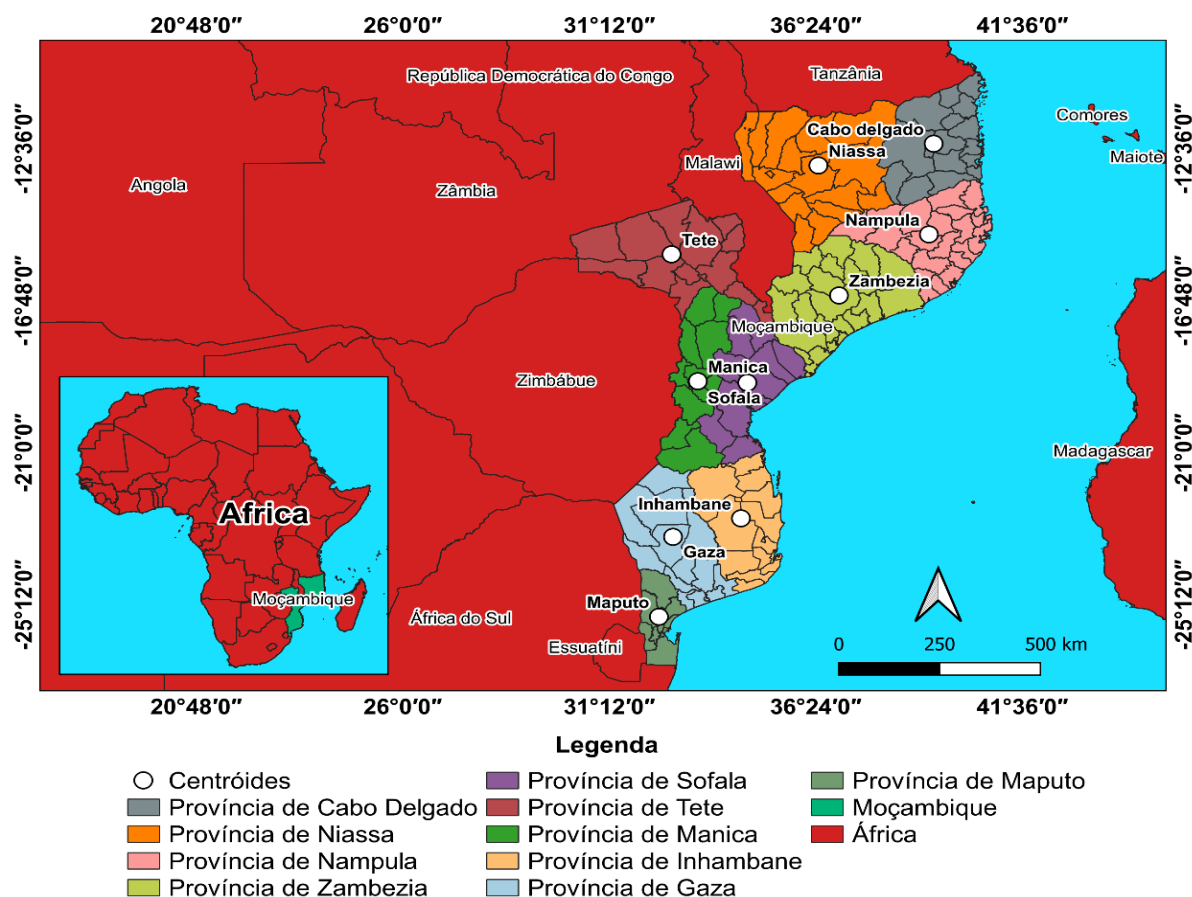
Neste contexto, este estudo analisa as tendências de longo prazo nos padrões de precipitação e temperatura em Moçambique entre 1994 e 2023, bem como avaliar os impactos dessas mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Área de Estudo

Moçambique está localizado ao longo da costa sudeste do continente africano, entre latitudes $10^{\circ}27'$ e $26^{\circ}52'$ Sul, e as longitudes $30^{\circ}12'$ e $40^{\circ}51'$ Leste, com uma extensão territorial estimada em cerca de 799.380 km^2 de terra firme e com uma população de 33,7 milhões de habitantes. Está subdividido em três regiões: região sul, que engloba as províncias de Maputo, Gaza e Inhambane, região central, que compreende as províncias de Sofala, Manica, Zambézia e Tete, e região norte que inclui Nampula, Cabo Delgado e Niassa (Figura 1).

Figura 1 - Localização geográfica de Moçambique com destaque para as províncias e os centroides utilizados na análise climática.



Preparado por Matheus Rodrigues Raniero (2025)
Geographic Coordinate System, Datum SIRGAS 2000

Cerca de 44% do território moçambicano é planície, maioritariamente na parte Sul do rio Save, apresentando altitudes inferiores a 200m. O planalto moçambicano é de cerca de 51% com altitudes entre 200 e 1000m, observados com maior frequência

no Norte e centro do país. Os últimos 5% são constituídos por montanhas de faixas não contínuas, onde o ponto mais alto localiza-se na província de Manica com altitude de 2436m (Dos Muchangos, 1999).

1.2.2 Fonte de Dados

A utilização dos dados de sensoriamento remoto neste estudo justifica-se pela escassez de dados e a distribuição de estações meteorológicas de forma homogênea em Moçambique, o que limita a confiabilidade de séries temporais contínuas e espacialmente representativas. A utilização de produtos como o *ERA5 Land* e o *CHIRPS* permitem superar essas limitações ao oferecerem estimativas climáticas contínuas e de alta resolução, essenciais para análises de longo prazo em contextos com infraestrutura de observação limitada (Funk *et al.*, 2015; Hersbach *et al.*, 2018; C3S, 2020; Segura *et al.*, 2019).

Os dados de temperatura foram obtidos do reanálise *ERA5-Land*, desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que iniciou a reanálise de dados atmosféricos e oceânicos em 1979 (Hersbach *et al.*, 2018). A versão *ERA5 Land*, sua mais recente evolução, incorpora componentes terrestres e cobre o período de 1950 até ao presente, com atualizações quase em tempo real (C3S, 2020). Essa base disponibiliza dados com resolução espacial aproximada de $\sim 9 \text{ km}$ ($0,1^\circ$) e resolução temporal horaria, sendo amplamente utilizada para análise da variabilidade climática e modelagem de padrões meteorológicos, especialmente em áreas com escassez de medições *in situ*. Diversos estudos demonstram sua elevada correlação com dados observados, atestando sua eficácia em análises anuais e estudos climáticos (Velikou *et al.*, 2022; Wakjira *et al.*, 2022; Yilmaz, 2022; Espinosa *et al.*, 2022).

Os dados foram obtidos por meio da plataforma *Google Earth Engine* (*GEE*), em partição horária, e posteriormente processados para agregação em médias anuais por província, considerando as coordenadas dos centróides. Esse tratamento teve como objetivo padronizar os dados temporais e possibilitar a análise de tendências ao longo do período de 1994 a 2023.

Para os dados de precipitação, foi utilizada a *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (*CHIRPS*), que integra estimativas via satélite com dados de estações pluviométricas quase global desde 1981 até o presente (Funk *et al.*, 2015).

Os dados possuem resolução espacial de $0,05^\circ$ (~5 km) e temporal diária, sendo amplamente aplicados em análises hidrológicas e climáticas. Para este estudo, os dados extraídos do GEE foram somados a fim de obter os totais anuais por províncias. O CHIRPS é reconhecido por sua confiabilidade em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas, embora sua precisão possa variar em função de condições geográficas e climáticas locais (Segura *et al.*, 2019).

Vários estudos indicam alta correlação entre os dados do CHIRPS e observações convencionais, consolidando sua relevância para aplicações climáticas (Silva, 2024; Pereira, 2024; Gwatida *et al.*, 2023; Terekhina, 2022; López-Bermeo *et al.*, 2022).

A obtenção dos dados por província foi baseada nas coordenadas dos centroides definidos como o ponto de equilíbrio geométrico de um polígono, representando a média ponderada de suas coordenadas espaciais (Apostol; Mnatsakanian, 2012; Ni *et al.*, 2022; Mitsubishi, 2022). As coordenadas dos centroides foram extraídas com a utilização da plataforma *Quantum Geographic Information System* (QGIS), utilizando *shapefiles* das províncias de Moçambique. O QGIS possibilitou a aplicação de algoritmos geométricos que asseguram precisão no cálculo dos centroides, conforme já demonstrado em outros estudos, como na determinação do centro geográfico da Itália (Aebischer, 2014). A ferramenta “centro de gravidade poligonal”, incorporada ao QGIS, recorre a propriedades geométricas para cálculo automatizado dos centroides com alto nível de exatidão (Mittal *et al.*, 2025).

A Tabela 1 apresenta as fontes dos dados, a descrição, unidade, resolução temporal e a sigla que represente a fonte.

Tabela 1 - Dados meteorológicos geoespaciais utilizados no estudo.

Fonte	Descrição	Unidade	Resolução	Índice
ERA5 - Land	Temperatura do ar a 2 m acima da superfície	$^\circ\text{C}$	1 hora ($0,1^\circ \approx$ 9 km)	E5T
CHIRPS	Precipitação diária acumulada	mm	1 dia ($0,05^\circ \approx$ 5 km)	CTP

A Tabela 2 apresenta as coordenadas dos centroides para cada província de Moçambique.

Tabela 2 - Informações geográficas de centroides de cada província de Moçambique.

Região	Província	Latitude	Longitude
Sul	Maputo	-25,5275	32,4501
	Inhambane	-22,8088	34,5146
	Gaza	-23,3206	32,8041
Centro	Sofala	-19,0619	34,6753
	Manica	-19,0204	33,4290
	Zambézia	-16,6513	36,9831
	Tete	-15,5148	32,7668
Norte	Nampula	-14,9648	39,2477
	Cabo delgado	-12,4586	39,3666
	Niassa	-13,0604	36,4651

1.2.3 Análise Estatística

Realizaram-se cálculos de medidas de posição e de dispersão para compreender o comportamento do conjunto de dados estudados. Nesse caso, usou-se o acumulado anual da precipitação e a média anual da temperatura e os desvios padrão anuais e médias e variações interanuais para cada província de Moçambique. Tais medidas são expressas através das seguintes equações:

$$\text{Média: } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Sendo que \bar{x} é o valor médio; x_i (são os dados obtidos de cada variável) números de observações e n o número de medições.

$$\text{Desvio Padrão: } s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Sendo o desvio padrão amostral a raiz quadrada do somatório das diferenças ao quadrado entre cada valor dos dados analisados e a média aritmética desses dados divididos pelo número total de dados analisados menos um.

Foi utilizada uma análise de tendência linear para determinar o padrão de variação na ocorrência de dados de temperatura durante o período de 30 anos em investigação. Assim, a taxa de aumento ou diminuição é indicada pela equação temporal da tendência linear, como ilustrado na equação 3, com referência a uma regressão simples:

$$Y(x) = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

em que x_i é o índice de tempo (ano), α é a interseção, β é a inclinação da linha de tendência e ε_i o resíduo (erro aleatório). A interseção e a inclinação são normalmente estimadas pelo método de mínimos quadrados ordinários. Por conseguinte, se a linha de tendência apresentar um coeficiente angular positivo, significa um aumento médio da temperatura média ao longo do período de 30 anos. Inversamente, se o coeficiente angular for negativo, isso indica uma diminuição da temperatura durante o período especificado.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização das variáveis meteorológicas precipitação e temperatura para o período de três décadas (1994-2023) foi realizada com base na estatística descritiva dos dados anuais por província em Moçambique. Foram calculados os acumulados anuais de precipitação e as médias anuais de temperatura, bem como os desvios da média interanual para cada variável, permitindo a avaliação da variabilidade climática ao longo do tempo. Além disso, foram determinados os valores mínimos, máximos e o desvio padrão interanual para ambas as variáveis, a fim de descrever a amplitude e a dispersão dos dados ao longo dos 30 anos.

Quando os valores anuais da precipitação estão dentro do intervalo de um desvio padrão, indicam flutuações normais, enquanto valores acima ou abaixo do intervalo de desvio padrão indicam anomalias climáticas como déficit ou excesso de chuvas. E para temperatura média anual, além das médias interanuais e os desvios padrão, foram consideradas a linha de tendência para cada província. Para os 30 anos (1994 a 2023) foi calculada a variação da temperatura entre o ano inicial e final, e o coeficiente angular positivo da linha de tendência representa aumento de temperatura, enquanto o coeficiente angular negativo diminuição da temperatura durante os 30 anos. A Tabela 3 resume as informações principais sobre as médias, desvios padrão e valores mínimos e máximos anuais.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas da precipitação e da temperatura média anual no período entre 1994 e 2023.

Província	Precipitação (mm)			Temperatura (° C)		
	Média (\pm DP)	Min (Ano)	Máx (Ano)	Média (\pm DP)	Min (Ano)	Máx (Ano)
Cabo	1018,97	600,27	1352,35	24,47	24,10	25,14
Delgado	(193,47)	(2020)	(2019)	(0,26)	(1994)	(2020)
Gaza	661,79	317,16	1214,58	24,50	23,22	25,57
	(185,65)	(2002)	(2000)	(0,56)	(2000)	(2019)
Inhambane	750,46	398,09	1146,50	23,76	22,82	24,47
	(196,03)	(2015)	(2000)	(0,44)	(2000)	(2015)
Manica	1100,48	670,18	1545,98	21,50	20,86	22,15
	(244,35)	(1995)	(2001)	(0,32)	(2000)	(2005)
Maputo	706,85	494,88	1325,42	22,74	21,73	23,57
	(182,91)	(2002)	(2000)	(0,43)	(2000)	(2015)
Nampula	1145,84	780,98	1477,96	23,79	23,30	24,28
	(180,76)	(2020)	(2008)	(0,27)	(1999)	(2005)
Niassa	1211,90	863,03	1489,55	23,38	22,70	24,09
	(189,96)	(1994)	(2002)	(0,31)	(2004)	(2020)
Sofala	1317,61	829,77	1933,44	23,95	23,38	24,65
	(261,72)	(2015)	(2001)	(0,31)	(1994)	(2016)
Tete	755,03	455,32	1055,28	24,60	23,54	25,55
	(147,69)	(1994)	(2001)	(0,51)	(1997)	(2005)
Zambézia	1378,75	976,41	1892,98	24,44	23,80	25,16
	(224,383)	(2008)	(1997)	(0,36)	(1999)	(2023)

Durante o período de 1994 a 2023, a estatística descritiva (média e desvios-padrão) de precipitação e temperatura revelou contrastes climáticos marcantes entre as regiões sul, centro e norte de Moçambique. A região centro apresentou a maior média pluviométrica (1137,97 mm) e o maior desvio padrão (281,84 mm), refletindo padrões semelhantes aos relatados por Manhique *et al.* (2023), que destacam a influência da variabilidade interanual associada a fenômenos como o EL Niño-Oscilação Sul (ENSO) e o dipolo do Oceano Índico, essa oscilação acentuada pode gerar impactos diretos sobre a previsibilidade climática e o manejo agrícola.

Por outro lado, a região norte, apresentou alta precipitação média (1125,57 mm), mas com menor variabilidade interanual (DP: 98,05 mm), indicando maior estabilidade hídrica, condição favorável ao planejamento agrícola, conforme

argumentado por Cohen *et al.* (2020) em sua meta-análise sobre impactos de extremos climáticos em sistemas produtivos. Já a região sul demonstrou ser a mais vulnerável, com a menor média pluviométrica (706,37 mm) e moderada variabilidade (DP: 188,20 mm). Esses resultados corroboram os achados de Mavume *et al.* (2021), que apontam para uma tendência de aridificação no sul de Moçambique, intensificada pela elevação das temperaturas e redução da frequência de eventos de precipitação intensa.

Quanto a temperatura, todas as regiões apresentaram médias próximas ($\sim 24^\circ$ C), mas a variabilidade térmica na região centro (DP: $1,44^\circ$ C) se destacou. Tal oscilação pode acentuar processos de evapotranspiração, comprometendo o balanço hídrico e aumentando a demanda hídrica das culturas, como discutido por Gannon; McGuire (2022). A região norte mostrou menor variabilidade térmica (DP: $0,55^\circ$ C), enquanto a região sul apresentou condições menos favoráveis pela combinação de menor precipitação e temperatura elevada com maior instabilidade, padrão que, segundo Salgotra; Chauhan (2023), contribui para o agravamento dos déficits hídricos, especialmente em sistemas agrícolas de sequeiro.

Essas evidências sustentam a hipótese de que os impactos das mudanças climáticas em Moçambique são regionais e desiguais, exigindo estratégias adaptativas diferenciadas por zona geográfica. A resiliência climática, portanto, dependerá da capacidade de incorporar essas especificidades nos planos de adaptação, como defendem Macamo (2022) e Loboguerrero *et al.* (2018) ao proporem caminhos para o fortalecimento da agricultura frente à variabilidade climática crescente.

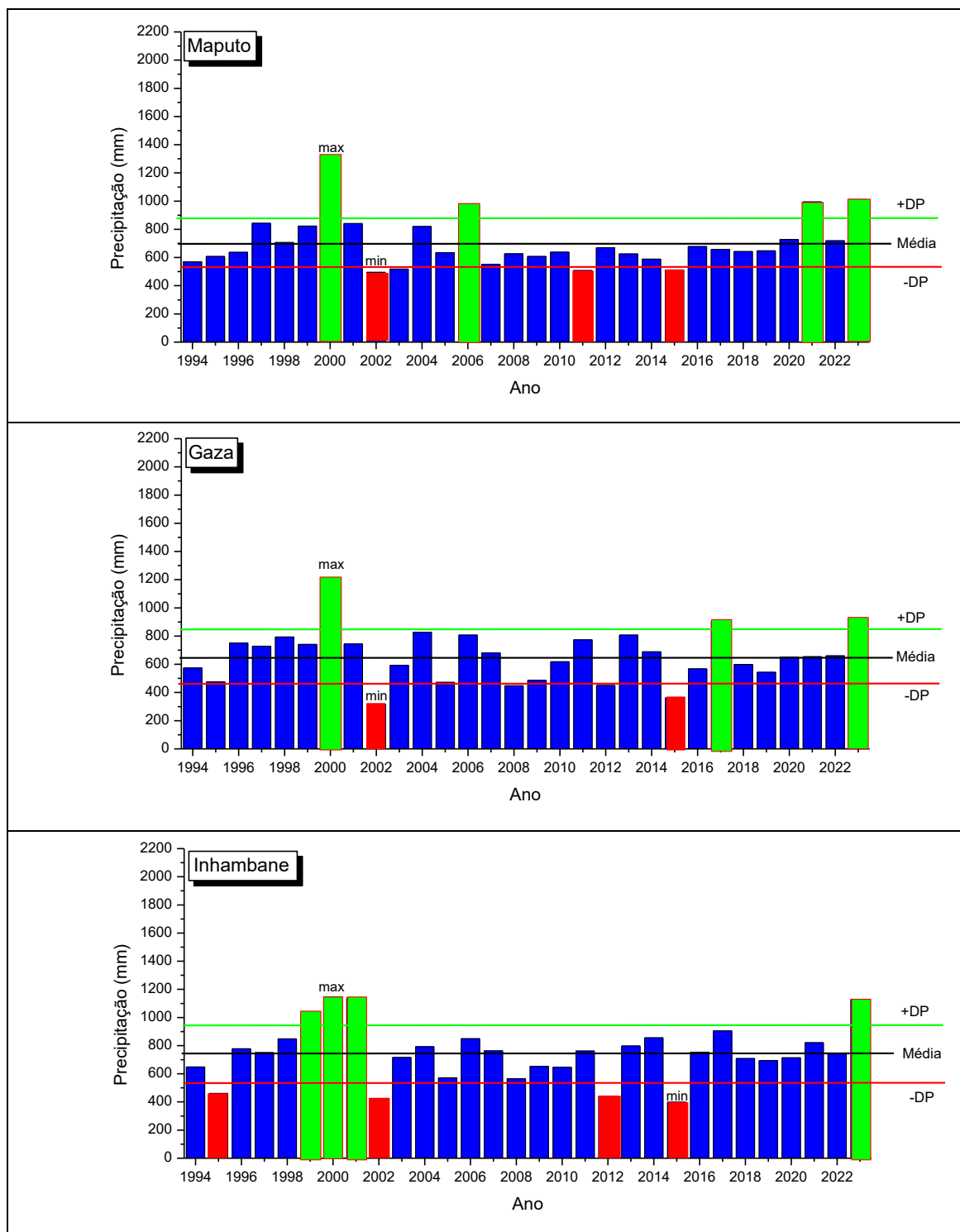
1.3.1 Variabilidade da precipitação interanual acumulada em Moçambique

A Figura 2 apresenta a distribuição do valor acumulado anual da precipitação em Moçambique, no período de 1994 a 2023. Foi calculada a média dos 30 anos e o respetivo desvio padrão, que aparecem na figura como linhas horizontais contínuas.

Considerando que aproximadamente 67% das observações se situam dentro do intervalo de um desvio padrão em torno da média, os valores que se encontram fora desse intervalo foram classificados como eventos atípicos ou extremos, indicando anos com comportamento climático anormal em relação à série histórica analisada. Os valores acima da linha de desvio padrão positivo representam os máximos de precipitação e estão em verde, ao passo que os valores abaixo da linha de desvio

padrão negativo representam os anos com as mínimas precipitações, provavelmente um cenário de ano seco, estando em vermelho.

Figura 2 - Variabilidade interanual da precipitação (1994-2023) nas províncias do sul de Moçambique.



Legenda: DP é o desvio padrão e MAX são os valores máximos.

A Figura 2 apresenta a variabilidade da precipitação interanual, demonstrando a ocorrência de déficit ou excesso de precipitação em anos específicos, sendo 2000 e 2023 anos de excesso de chuva na região, e os anos de 2002 e 2015 os que apresentaram déficit em todas as províncias da região.

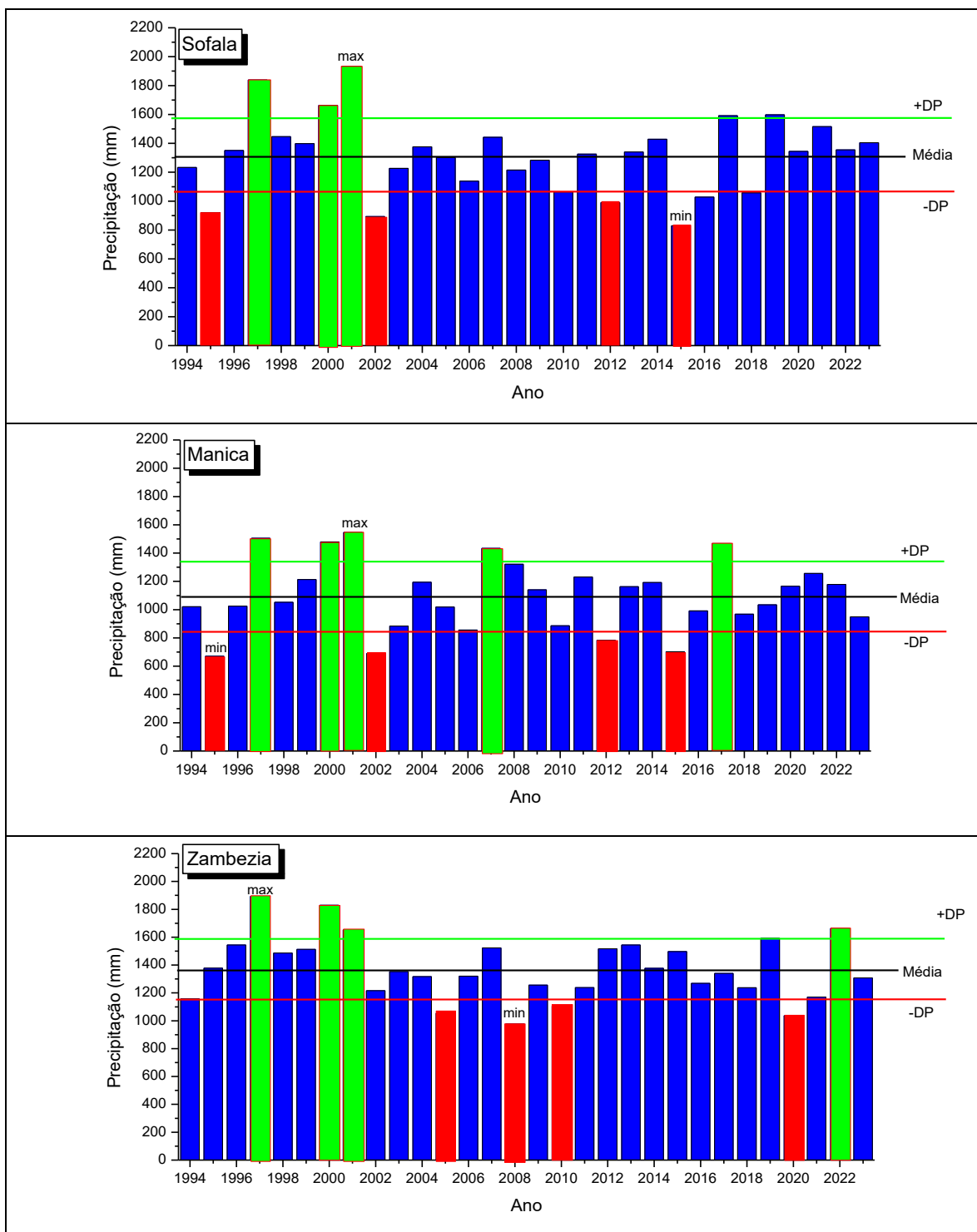
Em Maputo, foram observados anos de déficit de precipitação em 2002, 2011 e 2015, por outro lado, foram observados casos de precipitação excessiva em 2000, 2006 e 2023, com 2000 (1325,42 mm) a registar os níveis de precipitação mais elevados da região. Na província de Gaza, durante o período de 30 anos, apenas dois anos podem ser considerados secos: 2002 e 2015. E o ano de 2002 (317,16 mm) apresentou a menor precipitação não só na região sul, mas também na região centro.

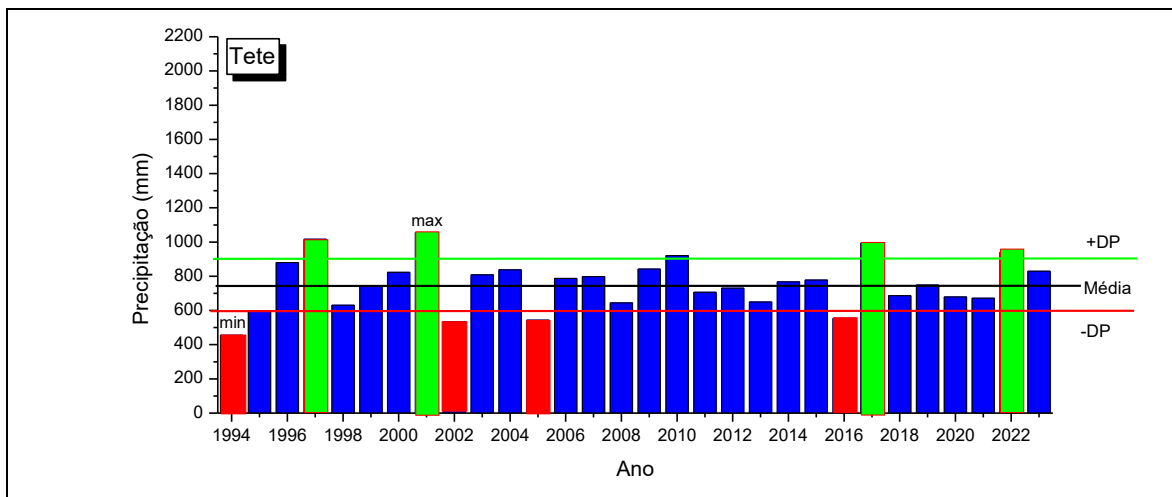
Para além disso, os anos com excesso de precipitação foram 2000, 2017 e 2023, sendo 2000 o ano com maior precipitação em Gaza. Em Inhambane, os anos de déficit foram observados em 1995, 2002, 2012 e 2015, enquanto os anos de excesso de precipitação foram registados em 1999, 2000, 2001 e 2023. A precipitação média interanual em Inhambane é a mais elevada da região sul (750,46 mm). A precipitação média interanual em Maputo foi de 706,85 mm, enquanto em Gaza foi de 661,79 mm.

Na região sul, a maioria dos anos apresentaram precipitação abaixo da média, indicando uma variabilidade interanual significativa na precipitação durante o período de 30 anos. Além disso, o excesso de precipitação em 2000, em todas as províncias do sul, pode estar associado ao ciclone que ocorreu durante este período em Moçambique (Reason, 2007; Malherbe *et al.*, 2014). E o déficit da precipitação presente no ano de 2002 em toda região sul de Moçambique está intrinsecamente ligado ao El Niño-Oscilação do Sul (ENSO), que apresenta uma correlação inversa e de impacto significativo na severidade das condições de seca em Moçambique (Chongue; Nishii, 2024). Além disso, a diminuição da frequência e intensidade dos ciclones tropicais neste ano, fenômenos que habitualmente influenciam a distribuição das chuvas, contribuiu para os níveis de precipitação observados na região (Ocean *et al.*, 2008).

A Figura 3 é referente a variabilidade da precipitação na região centro de Moçambique no período entre 1994 e 2023 (Sofala, Manica, Tete e Zambézia).

Figura 3 - Variabilidade da precipitação (1994-2023): províncias do centro de Moçambique.





Legenda: DP é o desvio padrão e MAX são os valores máximos.

As províncias de Sofala e Manica foram sujeitas a condições de déficit de precipitação nos anos de 1995, 2002, 2012 e 2015, enquanto nos anos de 1997, 2000 e 2001, registraram excesso de precipitação. A província de Manica registrou excesso de precipitação em 2007 e 2017, no entanto, os níveis mais elevados de precipitação foram observados em 2001 em ambas as províncias.

A província da Zambézia foi sujeita a condições de seca em 2005, 2008, 2010 e 2020, enquanto registrou níveis de excesso de precipitação em 1997, 2000, 2001 e 2022. Na província de Tete, os anos identificados como anos de seca foram 1994, 2002, 2005 e 2016. Por outro lado, registrou-se excesso de precipitação em Tete em 1997, 2001, 2017 e 2022. A precipitação mais baixa registrada nesta província, que representa também o nível mais baixo da região centro, ocorreu em 1994 (455,32 mm).

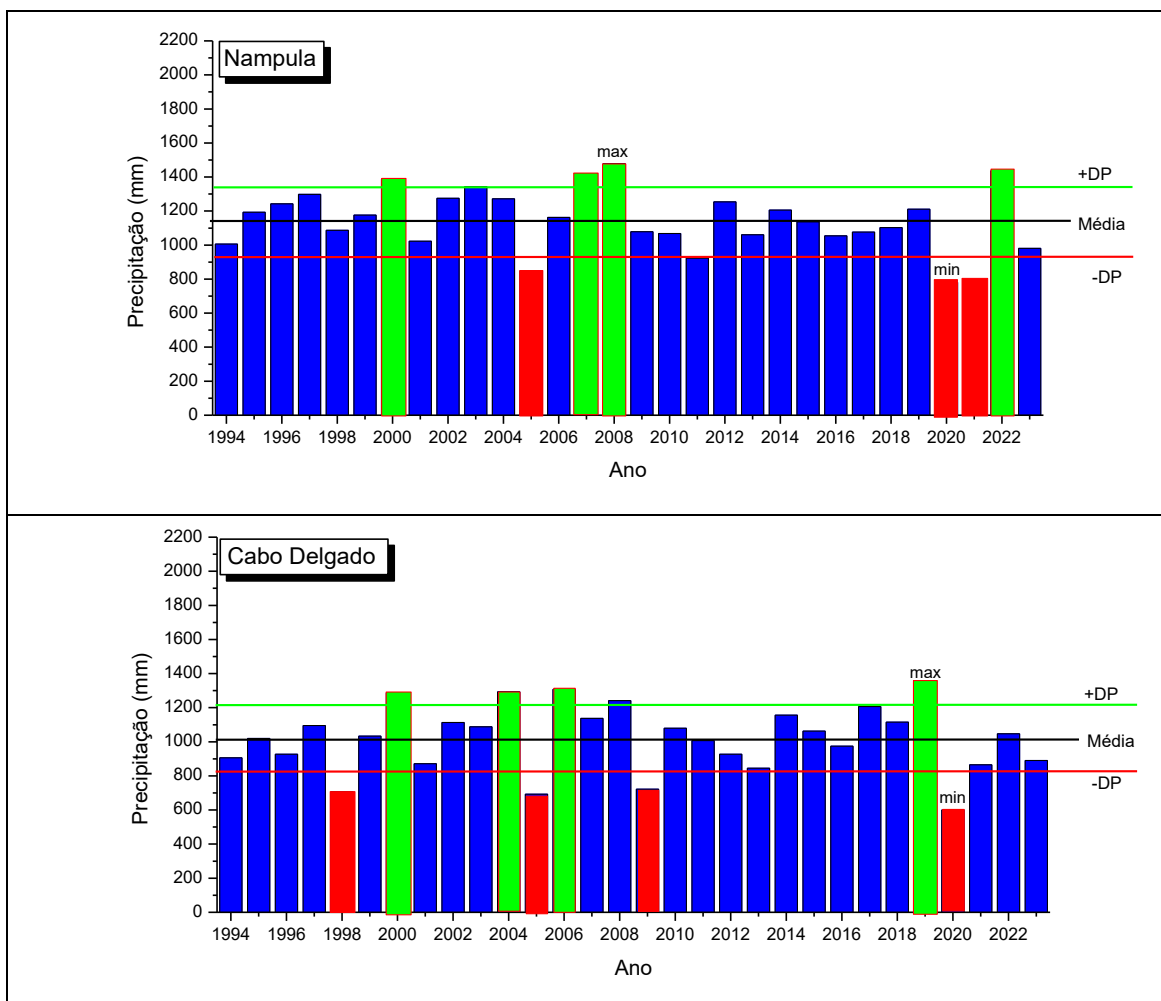
A precipitação média interanual em Sofala é de 1317,61 mm, em Manica 1100,48 mm e em Tete 755,03 mm. A província da Zambézia tem a maior precipitação média interanual na região centro de Moçambique, com uma média de 1378,75 mm.

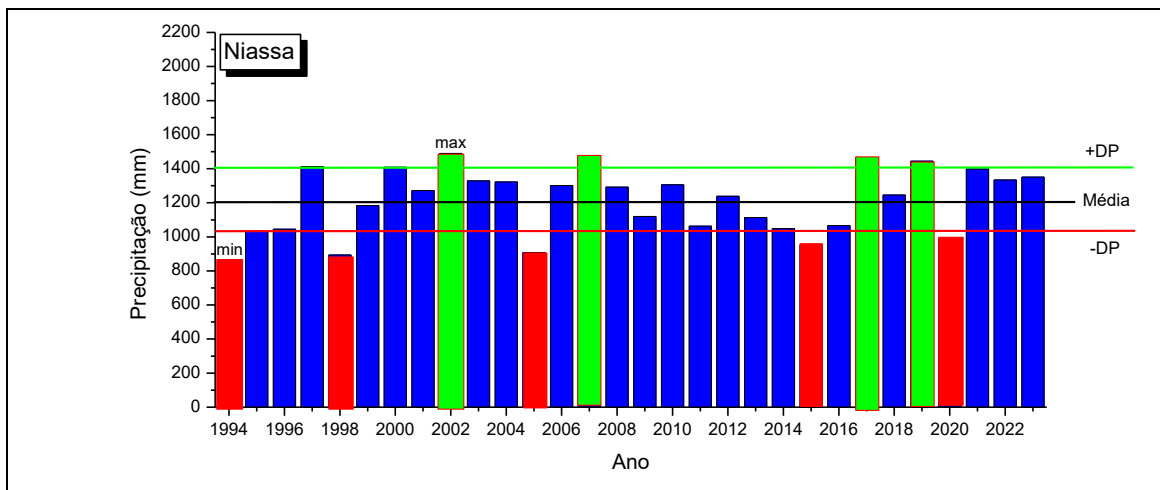
Para além disso, os dados indicam que em anos de precipitação abaixo da média, a Província da Zambézia apresenta uma variabilidade semelhante à observada na região centro. Contudo, nos casos em que a precipitação excede o desvio padrão positivo, alinha-se com os padrões climáticos observados na região norte. Este fato pode ser atribuído à sua localização geográfica e à diversidade do seu relevo.

Em contraste com as regiões sul e norte, duas províncias (Manica e Zambézia) na zona central registraram pelo menos metade do período de 30 anos com precipitação abaixo da média interanual. As restantes províncias (Tete e Sofala)

registraram níveis de precipitação acima da média interanual. É por isso que a variabilidade da precipitação na região central não é totalmente coerente entre as províncias. A Figura 4 é referente a variabilidade da precipitação na região norte de Moçambique.

Figura 4 - Variabilidade da precipitação (1994-2023): províncias do norte de Moçambique.





Legenda: DP é o desvio padrão e MAX são os valores máximos.

A província de Nampula registrou condições de seca em 2005, 2020 e 2021, com a seca mais significativa a ocorrer em 2020, que registrou 780,98 mm. Os anos 2000, 2007, 2008 e 2022 registaram precipitação acima do desvio padrão positivo. A província de Cabo Delgado registrou condições de seca em 1998, 2003, 2009 e 2020, com a seca mais significativa a ocorrer em 2020 (600,27 mm).

Em Cabo Delgado, foram registrados casos de precipitação excessiva em 2000, 2004, 2006 e 2019. Em Niassa, os anos em que foram observadas condições de seca incluem 1994, 1998, 2005, 2015 e 2020. Além disso, em 2002, 2007, 2015 e 2017, foram observados casos de excesso de precipitação, com os níveis mais altos ocorrendo em 2002, com 1489,55 mm.

No que diz respeito à média interanual, a província do Niassa apresenta a maior média interanual de precipitação na região, com um valor registrado de 1211,90 mm. A precipitação média interanual em Nampula durante o período especificado é de 1145,84 mm, enquanto na província de Cabo Delgado é de 1018,97 mm.

Em contraste com a região sul, a região norte apresenta uma maior prevalência de anos com precipitação superior ou igual à média. Isto ilustra que, para além das mudanças climáticas, a variabilidade da precipitação no norte de Moçambique é também influenciada pela localização geográfica e pelo relevo local associado.

Em Moçambique, a ocorrência de eventos de seca é mais prevalente nas regiões sul e centro durante a década inicial. Na região norte, a ocorrência de eventos de seca foi observada durante a última década do período de 30 anos em consideração (1994 a 2023).

Isto indica uma inversão das influências climáticas e do fenómeno El Niño em Moçambique. No que respeita à ocorrência de excesso de precipitação, não existe uma distribuição anual uniforme. No entanto, é possível observar o impacto de fenómenos naturais como os ciclones, que ocorreram em 1999, 2000 e 2022, no excesso de precipitação em todo o território moçambicano (Reason, 2007; Chongue; Nishii, 2024).

Esta variabilidade indica que os futuros ciclos de menor pluviosidade são suscetíveis de ocorrer nas regiões sul e centro, enquanto se prevê maior pluviosidade na região norte. É provável que estas variações sejam influenciadas por fenómenos como o El Niño e La Niña, que têm um impacto significativo nas regiões tropicais e subtropicais (Chongue; Nishii, 2024).

Estudos regionais sobre os ciclos ENSO (El Niño-Oscilação do Sul) indicam que Moçambique e outras áreas da África Austral são particularmente suscetíveis aos efeitos destes eventos. A ocorrência de eventos El Niño está tipicamente associada ao início de secas severas, enquanto os anos La Niña são caracterizados por precipitação acima da média (Reason, 2007; Malherbe *et al.*, 2014; Kusangaya *et al.*, 2020; Chongue; Nishii, 2024).

A análise da precipitação anual por décadas, demonstra que Zambézia manteve-se como a província mais chuvosa da região, com médias decenais de 1400 mm (1994-2003), 1280 mm (2004-2013) e 1350 mm (2014-2023). Seguidamente, a província de Sofala com médias decenais de 1300 mm (1994-2003), 1250 mm (2004-2013) e 1200 mm (2014-2023). Por sua vez, Manica apresentou uma estabilidade relativa ao longo das três décadas, com uma média de 1100 mm. Em contrapartida, Tete registou a precipitação mais baixa da região, com uma redução de 780 mm na primeira década para 750 mm na última, consolidando-se como a província mais árida da região. Os anos de 1997 e 2000 foram particularmente chuvosos, enquanto 2002 e 2015 registraram os menores volumes pluviométricos, afetando diretamente a disponibilidade hídrica para a agricultura de sequeiro.

Na região sul, Inhambane destacou-se como a mais chuvosa (770 mm/ano na média histórica), enquanto Gaza apresentou uma redução de 700 mm (1994-2003) para 620 mm (2004-2013), recuperando parcialmente para 750 mm (2014-2023). Maputo registou os maiores extremos, com registos de 1325 mm em 2000 e apenas 640 mm em 2005, e uma média decenal de 700 mm na última década (2014-2023). A alternância entre anos de seca e de chuvas intensas na região sul indica uma maior

instabilidade no regime pluviométrico, com anos críticos como 2005 e 2015, em que Gaza registou apenas 362 mm, o que pode comprometer severamente a produção agrícola.

Nampula foi a província mais chuvosa do Norte, com uma redução de 1200 mm (1994-2003) para 1130 mm (2014-2023). Cabo Delgado, por outro lado, apresentou uma redução de 1050 mm para 1000 mm, com variações interanuais acentuadas. A maior diminuição foi registrada na província de Niassa, cuja precipitação média anual variou de 1150 mm (1994-2003) para 990 mm (2014-2023), representando uma queda significativa ao longo das três décadas. O ano de 2020 destacou-se como um dos mais secos na região, com precipitações em torno de 600 mm. O padrão de precipitação na região norte apresenta uma tendência de redução, acompanhada de eventos extremos de seca e chuvas intensas, o que acentua a necessidade de estratégias robustas de adaptação climática.

A análise dos dados mostra que, em Moçambique, a precipitação média anual diminuiu 55 mm entre 1994 e 2023, correspondendo a aproximadamente 5,48% do total da precipitação média anual do período em questão. As variações regionais indicam um agravamento das condições de aridez, particularmente em Gaza, Niassa e Sofala, que registaram as maiores quedas. Por outro lado, Manica apresentou relativa estabilidade, enquanto Maputo registou um ligeiro aumento da precipitação, evidenciando as particularidades regionais nas mudanças climáticas no país.

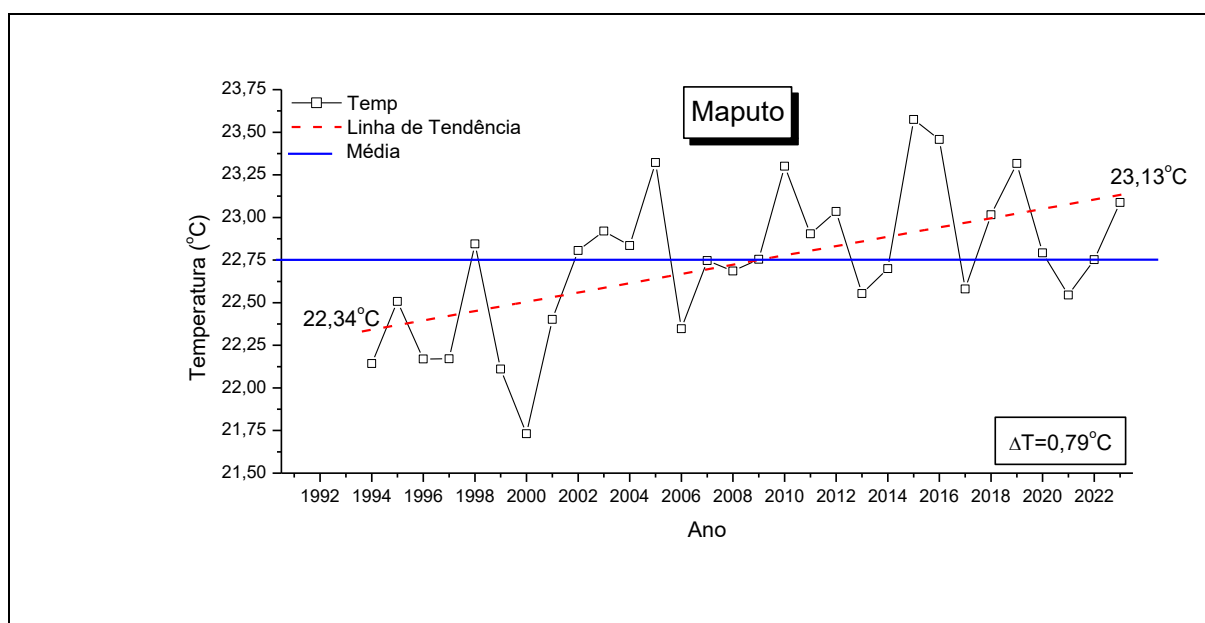
Embora esta diminuição ainda esteja abaixo das projeções do *Intergovernmental Panel Climate Change* (IPCC) (2023), que preveem uma diminuição de 10 a 20% na precipitação média na África Subsaariana, a intensificação dos períodos de seca já é evidente, com uma frequência de 2,5 a 3 eventos por década. Este padrão está alinhado com episódios como a seca severa de 2015-2017, cuja probabilidade de ocorrência triplicou devido às mudanças climáticas (IPCC, 2023). Estes resultados reforçam a necessidade de estratégias de adaptação para mitigar os impactos na disponibilidade hídrica e na segurança alimentar.

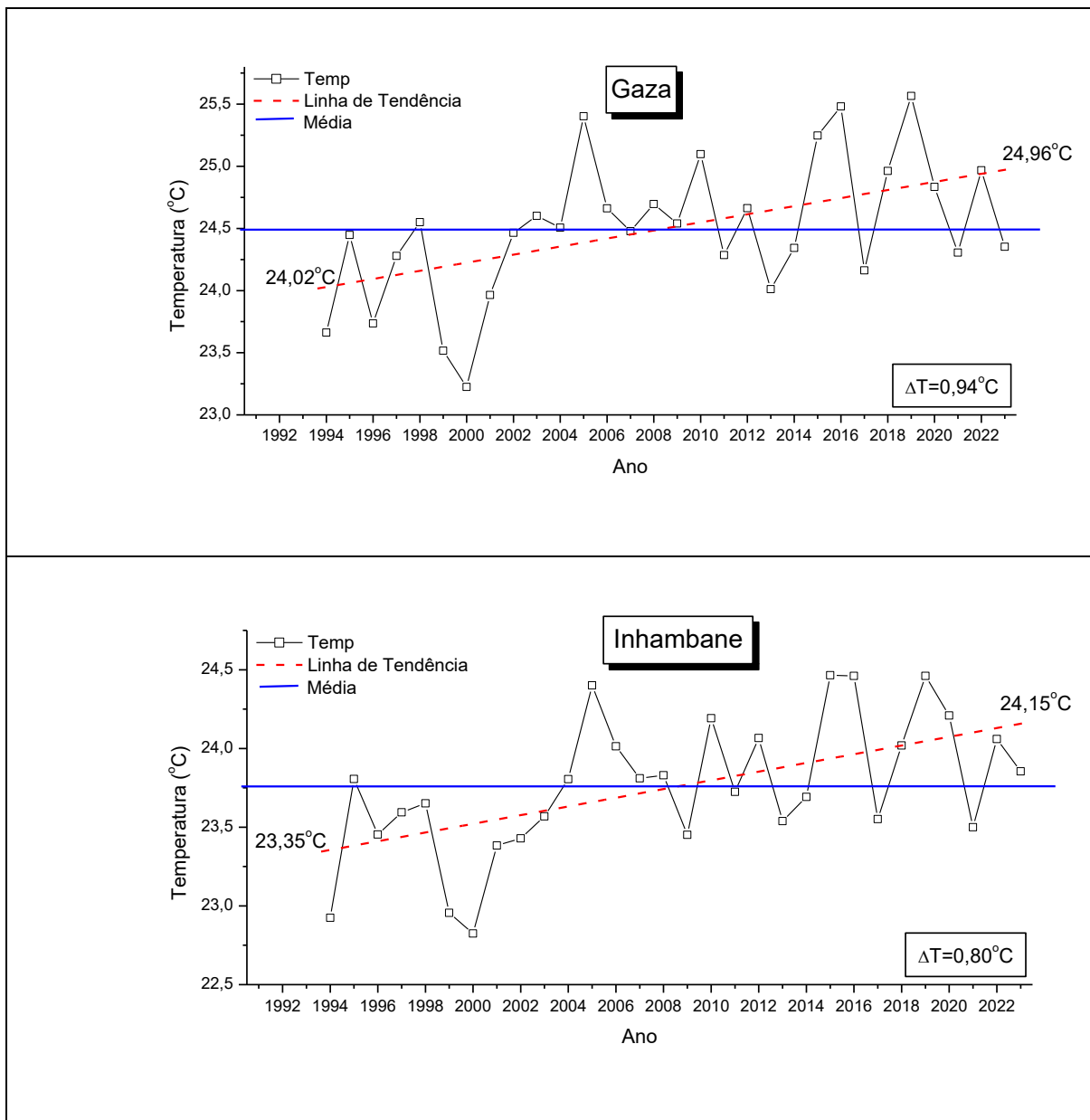
Esta tendência de redução pode implicar consequências quando à disponibilidade hídrica, tornando imperativo implementar estratégias de adaptação para assegurar a segurança hídrica e alimentar no país. A alternância de anos com precipitação muito elevada e anos com precipitação muito reduzida exige a implementação de técnicas agrícolas mais resilientes, como os sistemas agroflorestais e melhoria da infraestrutura de captação de água.

1.3.1 Variabilidade da temperatura média anual em Moçambique

Em relação à temperatura, as figuras apresentadas em 4, 5 e 6 referem-se a temperatura média anual durante um período de três décadas (1994-2023) nas províncias de Moçambique. Adicionalmente, foi calculada uma média interanual que está representada pela linha azul contínua nos gráficos. Adicionalmente, para verificar se houve um aumento ou diminuição da temperatura ao longo das três décadas, foi gerada uma linha de tendência usando regressão linear simples, que é ilustrada pela linha vermelha a tracejada nos gráficos. Se o coeficiente angular for positivo, a linha representa um aumento da temperatura média ao longo das três décadas. E se o coeficiente angular for negativo, significa uma diminuição da temperatura durante o período. A Figura 5 é referente temperatura média anual e interanual, e a tendência da temperatura na região sul de Moçambique (Maputo, Gaza e Inhambane).

Figura 5 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023): províncias do sul de Moçambique.





A temperatura média para a província de Maputo é de $22,74^\circ\text{C}$. A temperatura mais alta registrada foi de $23,57^\circ\text{C}$ em 2015, enquanto a mais baixa foi de $21,73^\circ\text{C}$ em 2000. Esta foi também a temperatura mais baixa registrada em toda a região sul de Moçambique.

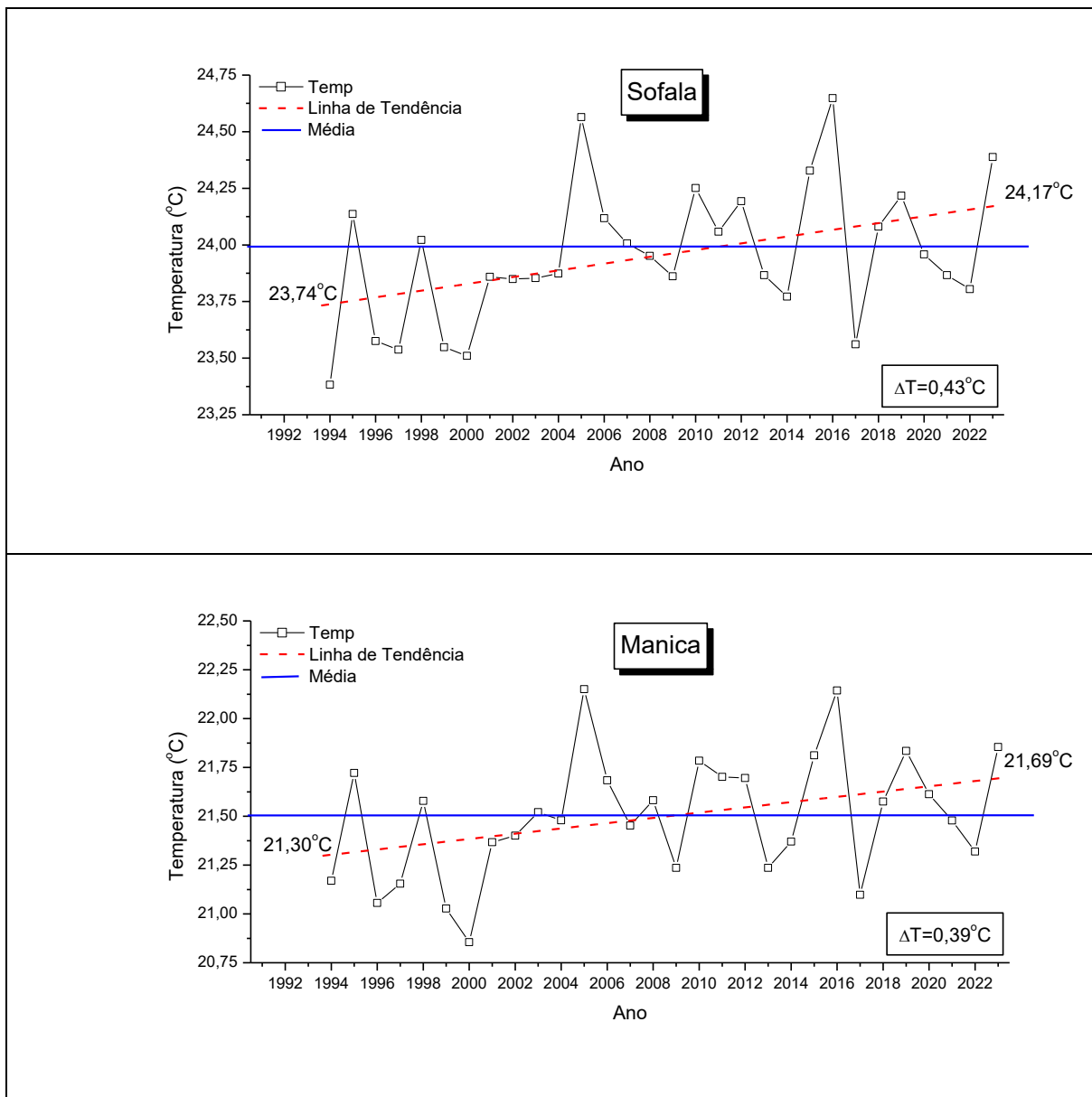
A temperatura média anual na província de Gaza é de $24,50^\circ\text{C}$, representando a média anual mais elevada da região sul. A temperatura média anual mais alta registrada foi de $25,57^\circ\text{C}$ em 2019, enquanto a mais baixa foi de $23,22^\circ\text{C}$ em 2000. Na província de Inhambane, a temperatura média anual é de $23,76^\circ\text{C}$. A temperatura mais alta registrada foi de $24,47^\circ\text{C}$ em 2015, enquanto a mais baixa foi de $22,82^\circ\text{C}$ em 2000.

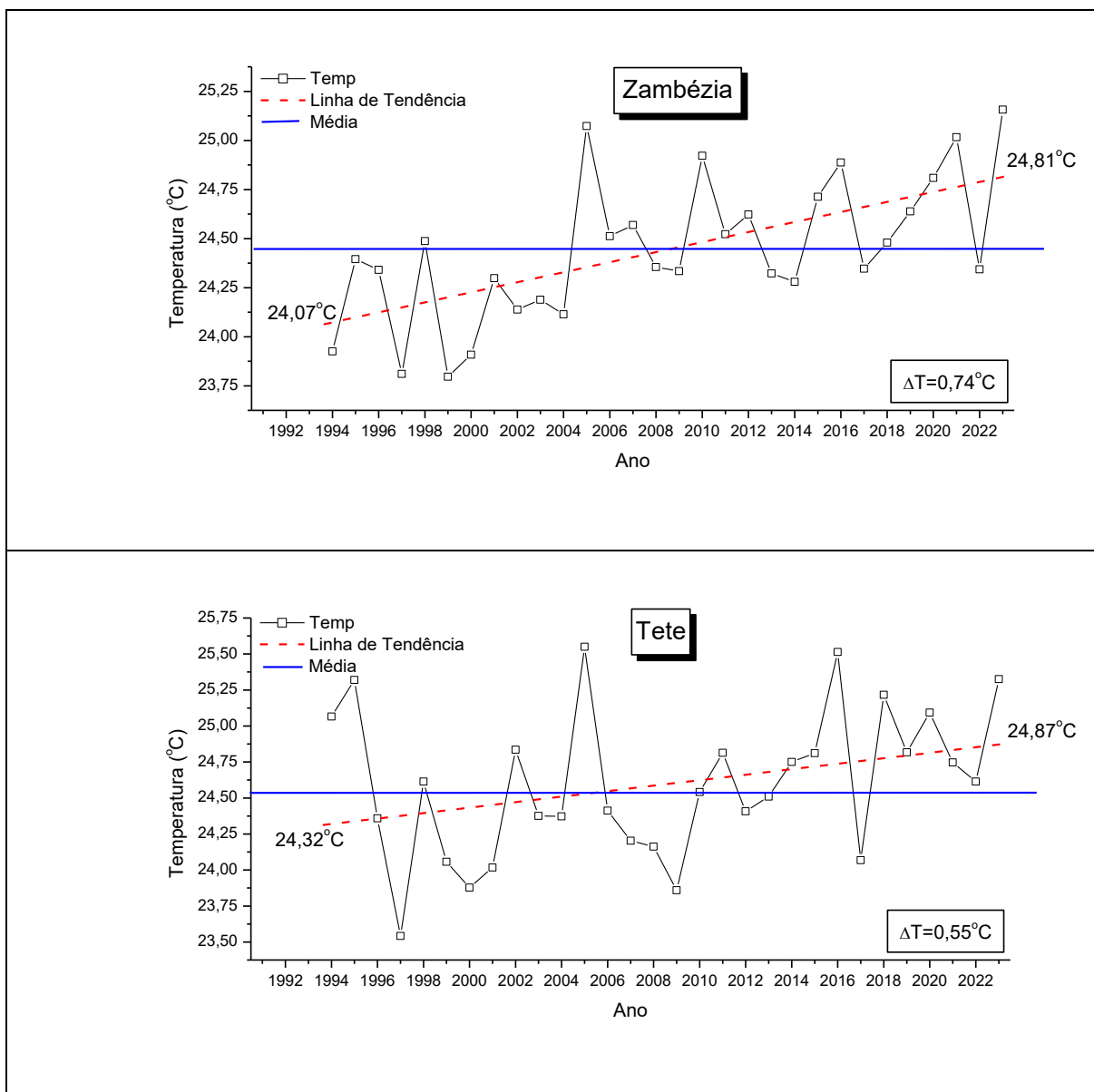
As flutuações de temperatura observadas no sul de Moçambique demonstram um padrão de picos abaixo da média anual até aproximadamente 2015, seguido de uma mudança para picos acima da média anual após esta data. Destaca-se o ano de 2000, caracterizado por temperaturas relativamente baixas associadas a níveis elevados de precipitação. Em contraste, os anos de 2015 e 2019 registraram, as temperaturas mais elevadas do período analisado, acompanhadas por baixos volumes de precipitação. Esses padrões reforçam a hipótese de um aquecimento progressivo na região ao longo da última década.

A análise da linha de tendência das temperaturas médias anuais nas províncias de Maputo, Gaza e Inhambane, entre 1994 e 2023, revela padrões distintos de variação térmica, que refletem as diferentes dinâmicas climáticas da região. A temperatura anual em Maputo apresentou uma tendência crescente de 22,34 °C para 23,13 °C, representando uma variação interanual de 0,79 °C durante o período de 30 anos em análise. Esta é a menor variação observada na região sul.

A linha de tendência em Gaza registou um aumento de 24,02 °C para 24,96 °C, representando uma variação da temperatura interanual de 0,94 °C, que é a mais significativa observada na região sul. Por outro lado, Inhambane registou um aumento de 23,35 °C para 24,15 °C, indicando uma variação de 0,80 °C. Em geral, a região sul indica um regime de variação térmica que pode estar a sofrer os efeitos das mudanças climáticas durante a última década. Isto fornece provas da influência projetada das mudanças climáticas na região, na África Austral e no mundo em geral. A Figura 6 mostra a temperatura média anual e interanual, e a tendência da temperatura na região centro de Moçambique (Sofala, Manica, Zambézia e Tete).

Figura 6 - Tendência da Temperatura anual (1994-2023): províncias do centro de Moçambique.





A temperatura média na província de Sofala é de 23,95 °C. A temperatura mais alta registrada foi de 24,65 °C em 2016, enquanto a mais baixa foi de 23,38 °C em 1994. A temperatura média anual na província de Manica é de 21,50 °C.

A temperatura mais alta registrada foi de 22,15 °C em 2019, enquanto a mais baixa foi de 20,86 °C em 2000. A temperatura mais baixa registrada na província de Manica também representa a temperatura média anual mais baixa para toda a região central. A temperatura média anual na província da Zambézia é de 24,44 °C. A temperatura mais alta registrada foi de 25,16 °C em 2023, enquanto a mais baixa foi de 23,80 °C em 1999.

A temperatura média anual mais elevada e a temperatura mais elevada da região foram registradas em Tete, com valores de 24,60 °C e 25,55 °C (2005),

respectivamente. A temperatura mais baixa registrada na província de Tete foi de 23,80 °C (1997).

Tal como observado na região sul, as flutuações de temperatura na região centro de Moçambique indicam valores anuais predominantemente inferiores à climatológica até cerca de 2015, com uma tendência de elevação para valores superiores à média nos anos subsequentes.

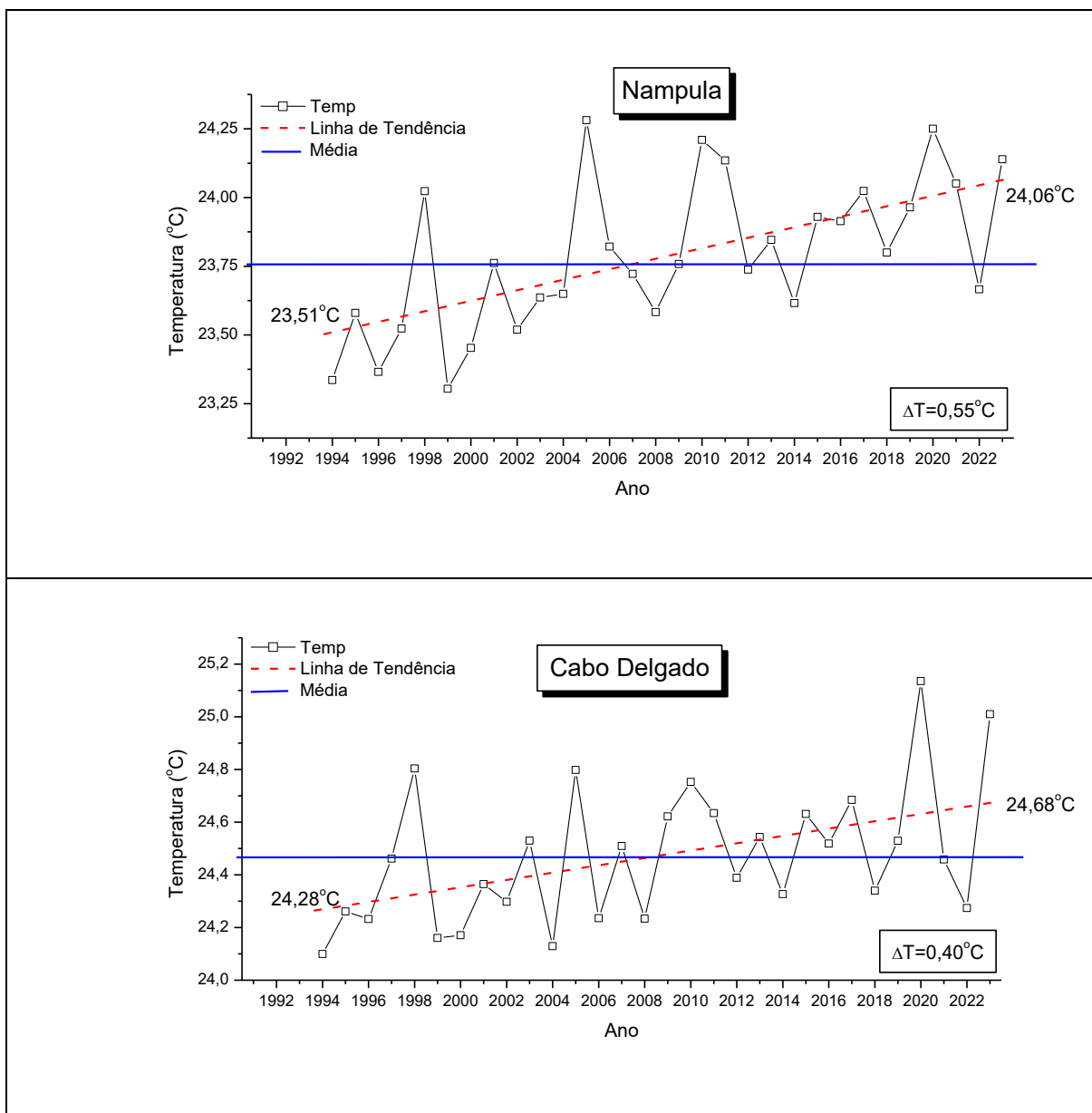
A linha de tendência da temperatura média anual nas províncias do centro de Moçambique, nomeadamente Sofala, Manica, Zambézia e Tete, durante o período de três décadas analisado, ilustra uma flutuação térmica que indica os diferentes processos climáticos e geográficos na região.

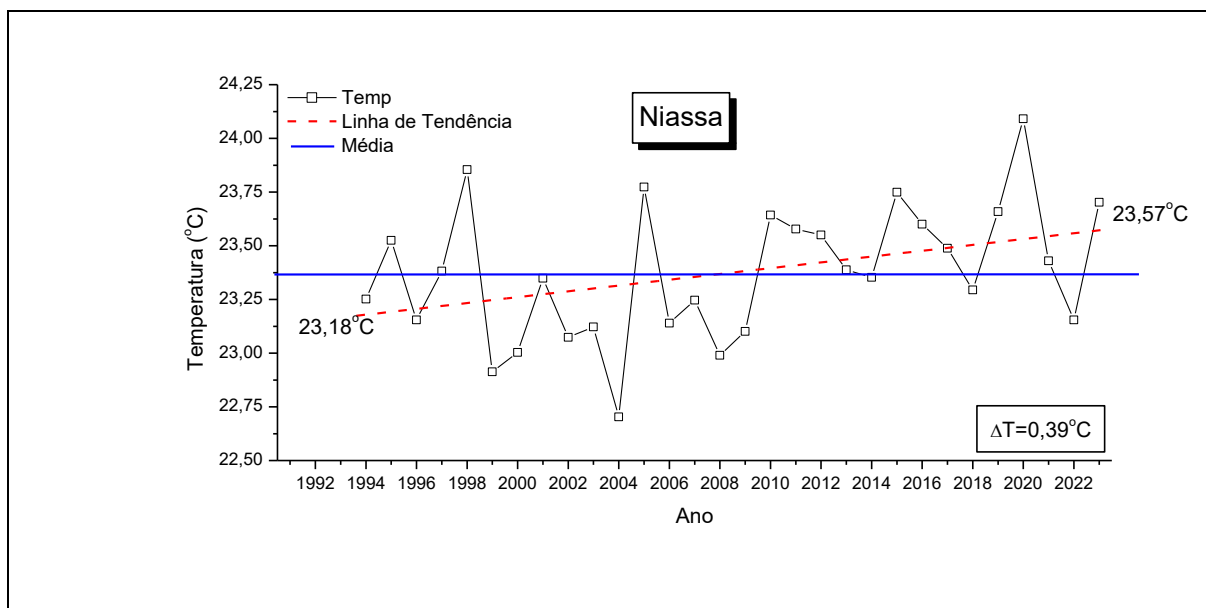
A linha de tendência mostra que temperatura em Sofala aumentou de 23,74 °C para 24,17 °C, com uma variação de 0,43 °C durante o período dos 30 anos. Em Manica, a tendência também é de 21,30 °C para 21,69 °C, uma variação de 0,39 °C, a variação mínima registrada na região centro.

A província da Zambézia registou o aumento mais acentuado, de 24,07 °C para 24,81 °C, representando uma variação de 0,74 °C. Esta é a variação de temperatura mais significativa observada na região centro durante o período em estudo. E a província de Tete registou um aumento de 24,32 °C para 24,87 °C, indicando uma variação de 0,55 °C.

Para além das implicações das mudanças climáticas nas variações de temperatura observadas (variando de 0,39 °C a 0,74 °C), a região centro de Moçambique destaca-se por ter as maiores altitudes do país, com o ponto mais alto localizado na província de Manica. A Figura 7 apresenta a temperatura média anual e interanual, e a tendência da temperatura na região norte de Moçambique.

Figura 7 - Tendência da Temperatura anual (1994-2023): províncias do norte de Moçambique.





Observa-se que Cabo Delgado e Niassa apresentaram os valores médios mais elevados na década de 2020. A maior temperatura foi registrada em Cabo Delgado (25,14 °C), enquanto a menor ocorreu em Niassa (22,70 °C). Em Nampula, a média interanual foi de 23,79 °C, com extremos de 24,28 °C (em 2005) e 23,30 °C (em 1999).

De forma semelhante às regiões sul e centro, a região norte demonstrou uma tendência de aquecimento, com valores inferiores à média interanual predominando até 2015 e superiores nos anos subsequentes. As temperaturas mais baixas concentram-se na primeira década do período analisado, enquanto os valores mais altos ocorreram principalmente após 2010.

As linhas de tendência indicam um aumento progressivo nas três províncias da região norte. Em Nampula, a temperatura elevou-se de 23,51 °C para 24,06 °C ($\Delta=0,55^{\circ}\text{C}$), sendo a variação mais significativa da região. Cabo Delgado registou um acréscimo de 0,40 °C (de 24,28 °C para 24,68 °C) e Niassa, a menor variação (0,39 °C).

Na região centro, também se observou um aumento gradual ao longo das três décadas. A província de Tete manteve os valores mais elevados, com um crescimento de 24,7 °C (1994-2003) para 25,0 °C (2014-2023). Manica, a mais fria da região, passou de 21,2 °C (1994-2003) para 21,7 °C (2014-2023). Zambézia e Sofala apresentaram aumentos de 0,7 °C e 0,4 °C, respectivamente. O aumento médio da temperatura no centro foi de 0,5 °C por década, com os anos de 2016 e 2020 associados a secas prolongadas e aumento da evapotranspiração.

A região sul evidenciou o aquecimento mais acentuado. Gaza destacou-se com uma elevação de 24,3°C (1994-2003) para 24,9°C (2014-2023), seguida de Inhambane ($\Delta=0,8^\circ\text{C}$) e Maputo ($\Delta = 0,5^\circ\text{C}$). O ano de 2016 foi o mais quente da região, com Gaza a atingir 25,5°C. a média de aumento térmico foi de 0,6° C no período de 1994 a 2023, revelando maior frequência de extremos térmicos.

Comparativamente, a região norte apresentou um aquecimento menos acentuado ($\Delta = 0,3^\circ\text{C}$), embora com maior variabilidade interanual, especialmente em 2015 e 2020. Cabo Delegado manteve-se como a província mais quente, enquanto Niassa, apesar de ser a mais fria, apresentou a maior variação térmica da região

Em nível nacional, os dados revelam um aumento médio de 0,6 °C entre 1994 e 2023, um valor inferior às projeções do IPCC (2023), que estimou uma elevação de 1,5° C globalmente, com aumentos superiores esperados para África Austral. Ainda que abaixo da projeção do *World Bank Group* (2023), que indicam um aumento de 0,8° C em 20 anos para cenários baseados em combustíveis fósseis, os impactos já são evidentes em Moçambique, com um aumento de secas, redução da precipitação, intensificação de eventos extremos (Kusangaya *et al.*, 2020; Niyonsenga *et al.*, 2024; Ussalu; Bassrei, 2023).

As implicações das mudanças climáticas para o setor agrícola são significativas. A elevação da temperatura e a redução da precipitação média anual afetam diretamente a produtividade agrícola, particularmente entre pequenos produtores que dependem da agricultura do sequeiro (FAO, 2021; IPCC, 2023). Períodos de seca prolongada comprometem a irrigação, e outros eventos pluviométricos intensos causam erosão, degradação do solo e alagamentos, prejudicando o desenvolvimento das culturas (Kusangaya *et al.*, 2020; Ussalu; Bassrei, 2023).

Estudos apontam que essas mudanças reduzem a resiliência dos sistemas agrícolas e intensificam os riscos de insegurança alimentar, sobretudo em regiões vulneráveis da África Austral (Niyonsenga *et al.*, 2024; *World Bank Group*, 2023). Na ausência de estratégias eficazes de mitigação e adaptação, os impactos das mudanças climáticas poderão agravar a vulnerabilidade socioeconômica das comunidades rurais e comprometer a sustentabilidade da produção agrícola (FAO, 2021).

1.4 CONCLUSÕES

A análise da precipitação em Moçambique ao longo de três décadas indica uma variabilidade significativa, com 2002 e 2015 como os anos mais secos (317,16 mm) e 2000 e 2023 como os mais chuvosos (1325,42 mm). A região sul apresentou maior suscetibilidade à seca, enquanto a região central apresentou considerável variabilidade anual, conforme demonstrado pelos 455,32 mm de Tete em 1994 e pela média de 1378,75 mm na Zambézia. A região norte, Niassa registou a maior precipitação (1489,55 mm em 2002), mas também sofreu uma seca severa em 2020.

Relativamente à temperatura, Moçambique apresenta um aumento progressivo indicativo do fenómeno de aquecimento global, com as temperaturas mais baixas em 2000 (21,73°C em Maputo e 20,86°C em Manica) e as mais altas em 2019 (25,57°C em Gaza e 25,55°C em Tete). As províncias do centro e do Sul registaram mudanças significativas de temperatura, com Gaza a aumentar 0,94° C e a Zambézia 0,74° C em três décadas.

Moçambique enfrentou uma redução média de 55 mm na precipitação anual nas últimas três décadas (-5,48%), com as maiores quedas observadas em Gaza, Sofala e Niassa. Paralelamente, a temperatura média aumentou 0,6°C, sendo mais acentuada no sul (+0,6°C), seguida pelo centro (+0,5°C) e norte (+0,3°C), com picos em 2016 e 2020, anos de menor pluviosidade. Embora inferiores às projeções do IPCC (2023), estas mudanças já comprometem a segurança hídrica e agrícola, tornando imprescindíveis políticas de mitigação e adaptação para garantir a resiliência climática do país.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, E. et al. Creating tools for the generation of weather-based crop calendars to support climate services. In: **EUROPEAN METEOROLOGICAL SOCIETY ANNUAL MEETING**, 2024, Barcelona. **Proceedings**. Barcelona: EMS, 2024. EMS2024-608. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/ems2024-608>.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- ANA, C. O. F. et al. How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. **Environmental Research Letters**, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f42>.
- ANJALI, J. et al. Understanding heat and drought stress adaptation mechanisms in wheat: a combined approach. **Journal of Cereal Research**, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.25174/2582-2675/2022/125723>.
- ARORA, N. K. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. **Environmental Sustainability**, v. 2, p. 95–96, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>.
- BADACHO, T. B. et al. Climate change impact on rain-fed maize yield cultivated with small-scale landowners in Wolaita Zone, Ethiopia. **International Journal of Energy and Environmental Science**, v. 9, n. 2, p. 20–37, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.11648/j.ijees.20240902.11>.
- BENJAMIN, I. C. et al. Investigating the strength and variability of El Niño Southern Oscillation teleconnections to hydroclimate and maize yields in southern and East Africa. **Journal of Hydrometeorology**, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/jhm-d-23-0098.1>.
- BENTO, C.; CARDOSO, P.; BEILFUSS, R. D.; CHIMIMBA, C. T. Zoogeographic regionalisation of terrestrial vertebrates of Mozambique. **African Journal of Ecology**, [S.l.], v. 62, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/aje.13248>.
- BIASUTTI, M. Rainfall trends in the African Sahel: Characteristics, processes, and causes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(1), e591, 2019. <https://doi.org/10.1002/wcc.591>
- CHEIN, F. *Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas*. Brasília: ENAP, 2019. ISBN 978-85-256-0115-5. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4788/1/Livro_Regressão%20Linear.pdf.
- CHRIS, J. C.; REASON, C. J. C. Tropical cyclone Dera, the unusual 2000/01 tropical cyclone season in the South West Indian Ocean and associated rainfall anomalies over Southern Africa. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 97, n. 1, p. 181–188, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00703-006-0251-2>.

COHEN, I. et al. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. **Physiologia Plantarum**, v. 171, n. 1, p. 66–76, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ppl.13203>.

DOS MUCHANGOS, A. *Moçambique: paisagens e regiões naturais*. Maputo: [s.n.], 1999.

FERRIER, H.; RUPPEL, O. C. Country report for Mozambique. In: **RUPPEL, O. C.; GINZKY, H.; MURRAY, R. (Org.)**. *Legal Pathways to Sustainable Soil Management in Africa*. Baden-Baden: Nomos, 2025. p. 393–466. Disponível em: <https://doi.org/10.5771/9783748951230-393>.

FLANAGAN, P. X. Precipitation and temperature maxima: a study across the Southern Great Plains winter wheat region. **Earth Interactions**, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/ei-d-23-0019.1>.

FORTHOFFER, R. N.; LEHNEN, R. G. *Public program analysis*. [S.l.]: Springer, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6683-6>.

GUPTA, K. Intercomparison of the performance of CHIRPS satellite rainfall data and gauge gridded IMD data for hydrological modelling. In: *Lecture Notes in Civil Engineering: Hydrology and Hydrologic Modelling*, 2023. p. 195–202. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-19-9147-9_14.

GWATIDA, T. et al. Is climate really changing? Insights from analysis of 30-year daily CHIRPS and station rainfall data in Zimbabwe. **Scientific African**, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01581>. Acesso em: 31 maio 2025.

HOGUANE, A. Perfil diagnóstico da zona costeira de Moçambique. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 69–82, 2007. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/rgci11.html>. DOI: 10.5894/rgci11. Acesso em: 02 jun. 2025.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: principles and practice**. 3. ed. Melbourne: OTexts, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE). **Anuário Estatístico 2019 Moçambique**. Maputo: Instituto Nacional de Estatística, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

JIANHUA, N. et al. Method to determine the centroid of non-homogeneous polygons based on suspension theory. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi11040233>.

JOHAN, B. et al. The bi-decadal rainfall cycle, Southern Annular Mode and tropical cyclones over the Limpopo River Basin, southern Africa. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 11, p. 3121–3138, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00382-013-2027-Y>.

MANHIQUE, A.; REASON, C.; BARIMALALA, R. Rainfall onset and cessation over Mozambique and relationship with sea surface temperature and atmospheric patterns. **International Journal of Climatology**, [S.I.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.8120>.

JAYA, I. G. N. M. et al. A relationship between temperature and precipitation over the contiguous Bandung city, Indonesia. **Communications in Mathematical Biology and Neuroscience**, [S.I.], n. 2020:63, 2020.

MOSISA, T. W.; NADAV, P.; PAOLO, B.; PETER, M. Gridded daily 2-m air temperature dataset for Ethiopia derived by debiasing and downscaling ERA5-Land for the period 1981–2010. **Data in Brief**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108844>.

MUGIYO, H. et al. El Niño's Effects on Southern African Agriculture in 2023/24 and Anticipatory Action Strategies to Reduce the Impacts in Zimbabwe. **Atmosphere**, v. 14, p. 1692, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos14111692>.

ORIGIN, evolution, production, and utilization of cereals. *Origin, evolution, production, and utilization of cereals*, p. 1–15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95295-8.00016-2>.

Paredes-Trejo, F. J., Barbosa, H. A., & Peñaloza-Murillo, M. A. (). Evaluation of satellite-based precipitation estimates for drought monitoring in Venezuela. *Atmospheric Research*, 213, 218–233, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.006>

POUDEL, S. et al. Negative synergistic effects of drought and heat during flowering and seed setting in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105769>.

QI, Y. et al. Effects of high temperature and drought stresses on growth and yield of summer maize during grain filling in North China. **Agriculture**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111948>.

RAJU, B. et al. Effects of drought and heat stresses during reproductive stage on pollen germination, yield, and leaf reflectance properties in maize (*Zea mays* L.). **Plant Direct**, v. 6, n. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pld3.434>.

SALGOTRA, R. K.; CHAUHAN, B. S. Ecophysiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to drought and high temperature. **Agronomy**, v. 13, p. 1877, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13071877>.

SAMARA, F. da S. Validation of the CHIRPS precipitation estimate in a Brazilian Cerrado area. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p860-881>.

TIWARI, S. et al. Climate Trends and Future Projections: Analyzing Temperature and Precipitation Patterns in the Guwahati Region. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4070094/v1>.

VALENTE, P. T. et al. Classification of precipitation anomalies in the Rio Grande do Sul in ENSO events in the 20th century. **Sociedade & Natureza**, v. 35, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/sn-v35-2023-66073>.

YANG, X. et al. Rainfall and maximum temperature are dominant climatic factors influencing APSIM-maize cultivar parameters sensitivity in semiarid regions. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4693866>. Acesso em: 2 jun. 2025.

YASHAVANTHAKUMAR, K. J. et al. Impact of heat and drought stress on phenological development and yield in bread wheat. **Plant Physiology Reports**, v. 26, n. 2, p. 357–367, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00586-0>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ZUMA-NETSHIUKHWI, G. Analysis of rainfall and temperature changes and variability over Glen Farm, South Africa. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, v. 16, n. 2, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/ajaar/2021/v16i230169>. Acesso em: 2 jun. 2025.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS

2.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a agricultura mundial tem sofrido transformações significativas devido às mudanças climáticas, às inovações tecnológicas e às forças do mercado. Verificou-se que a produção agrícola global diminuiu 1 a 5% por ano, um fenómeno que teve um impacto particularmente significativo nas regiões tropicais, devido a fenómenos climáticos como as secas e as inundações (Loboguerrero *et al.*, 2018). Além disso, as crises alimentares intensificaram-se devido ao adiamento das estações de crescimento, especialmente em regiões susceptíveis como a América Central e partes de África (Loboguerrero *et al.*, 2018). Em África, o impacto das mudanças climáticas é especialmente grave nas regiões norte e sul do continente, onde os sistemas agrícolas apresentam uma menor resiliência (Orina *et al.*, 2024). Em Moçambique, os desafios em questão são particularmente evidentes, dado que a dependência da agricultura de sequeiro agrava a vulnerabilidade (Schulman, 2023; Niyonsenga *et al.*, 2024).

Moçambique, um país do sudeste de África com um clima predominantemente tropical úmido e uma costa de 2.700 km, tem sofrido uma influência considerável na prática agrícolas devido às mudanças climáticas (Houguane, 2007; Maure *et al.*, 2012). Considerando que, em cerca de 95% da agricultura moçambicana depende exclusivamente das chuvas, torna-se fundamental o conhecimento acerca da evapotranspiração, da precipitação e do balanço hídrico climatológico, uma vez que influencia diretamente na umidade do solo, que é essencial para o crescimento das plantas e para a produtividade agrícola (Kipkemoi *et al.*, 2021; Wanniarachchi; Sarukkalige, 2022; Reddy *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024; AL-Falahi *et al.*, 2024).

Neste contexto, a compreensão do balanço hídrico climatológico é crucial, uma vez que possibilita a avaliação das potencialidades e das vulnerabilidades da disponibilidade hídrica em regiões produtoras, facilitando o planeamento agrícola e a gestão eficiente dos recursos hídricos. (Louzada *et al.*, 2018; Reichardt; Timm, 2020; Westermann, 2023). O balanço hídrico constitui um conceito fundamental na área da hidrologia, uma vez que abrange vários fatores referentes à demanda e disponibilidade hídrica, tais como, precipitação (P), temperatura (T),

evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) (Gannon; McGuire, 2022; Hussein; Azad, 2023). A análise desses fatores é importante para uma gestão eficaz dos recursos hídricos, permitindo a adoção de estratégias para mitigar impactos climáticos e otimizar a produtividade agrícola (Tran; Fehér, 2022; Li *et al.*, 2024).

O método de balanço hídrico climatológico de Thornthwaite (1948), aprimorado por Thornthwaite; Mather (1955) para uma análise mais abrangente do balanço hídrico, tornou-se uma das abordagens mais utilizadas em diferentes condições climáticas e tipos de solos (Mammoliti *et al.*, 2021; Rodrigues, 2021). Além de ser amplamente utilizado para a classificação climática e análise variações climáticas históricas regionais, esse método também é aplicado na investigação agroclimática ao avaliar a disponibilidade, DEF e EXC de umidade do solo, o que o torna uma ferramenta robusta para a gestão hídrica e agrícola (Jesus, 2015; Gonçalves *et al.*, 2020; Mammoliti *et al.*, 2021; Querino *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2023; Filho *et al.*, 2025).

O método calcula a ETP com base nos dados de temperatura média mensal e, posteriormente, utiliza dados de precipitação e capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) para determinar o balanço hídrico e seus componentes, como DEF e EX (Francisco *et al.*, 2017; Al-Sudani, 2019; Mammoliti *et al.*, 2021). A simplicidade do método e a necessidade mínimos de variáveis meteorológicas de entrada, permitem uma implementação mais fácil em regiões com escassez de dados, ao contrário de métodos mais sofisticados, como Penman-Monteith FAO-56, que requerem mais variáveis meteorológicas (Venâncio *et al.*, 2018; Mammoliti *et al.*, 2021; Rodrigues, 2021; Valle *et al.*, 2021).

No Cerrado brasileiro, o método Thornthwaite-Mather indicou mudanças significativas para climas áridos, impactando negativamente a agricultura e o abastecimento de água (Filho *et al.*, 2025). Um aplicativo web, o *WaterBalance*, foi criado para bacias hidrográficas europeias para aprimorar a aplicabilidade do método Thornthwaite-Mather no gerenciamento moderno da água (Mammoliti *et al.*, 2021). Uma avaliação de seis estações meteorológicas no Benin, África Ocidental, de 1970 a 2015 revelou uma disparidade na disponibilidade de água, com as áreas costeiras exibindo um excedente em comparação com o norte propenso à seca, destacando o aumento da vulnerabilidade agrícola devido à diminuição das chuvas (Todote *et al.*, 2021).

A falta de estudos nacionais ou regionais de balanço hídrico em Moçambique enfatiza a necessidade de pesquisas resumindo precipitação, evapotranspiração e armazenamento de água no solo para uma gestão sustentável de recursos hídricos e agrícolas. Um estudo feito em Chimoio, Moçambique, indicou uma substancial variabilidade anual das chuvas, variando de 546,6 mm a 1724 mm, com uma média de 1016,63 mm. Além disso, um DEF anual de 240 mm foi registrado de abril a novembro, juntamente com um EXC de 226,4 mm e um ETP de 96,4 mm de dezembro a janeiro, o que contribui para a diminuição do armazenamento de água no solo (Cangela *et al.*, 2023).

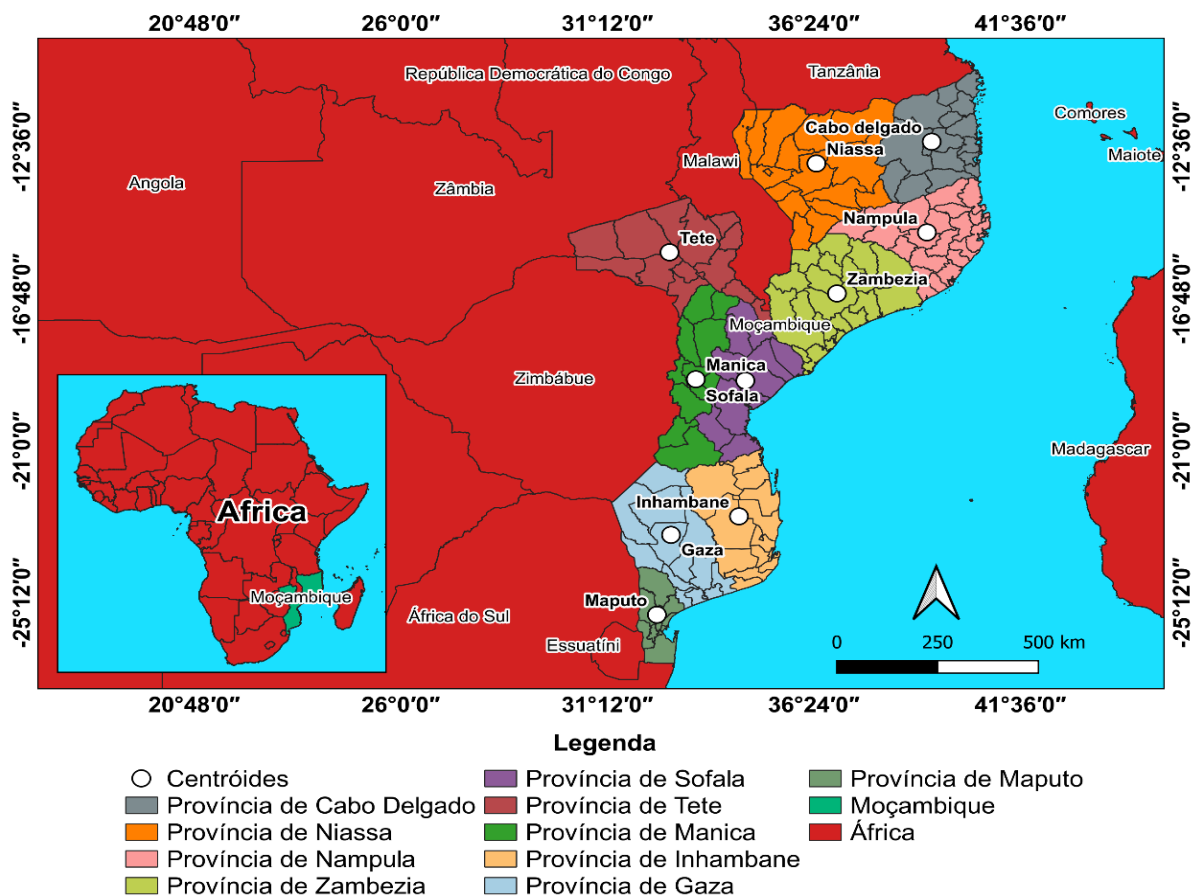
Com base nesses aspectos, esta pesquisa tem como objetivo calcular o balanço hídrico climatológico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), utilizando dados da reanálise ERA5-Land e CHIRPS, visando fornecer subsídios para o planejamento agrícola e o zoneamento agroclimático em todas as províncias de Moçambique. Os dados de temperatura do ERA5-Land e de precipitação do CHIRPS são amplamente utilizados em estudos hidrológicos e climáticos devido à sua alta resolução espacial e consistência global.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de Estudo

Moçambique situa-se na costa sudeste do continente africano, especificamente entre as latitudes 10°27' e 26°52' sul, e as longitudes 30°12' e 40°51' este. O país possui uma área de 799.380 km² de terra firme e faz fronteira ao sul com Essuatíni e a África do Sul, ao norte com a Tanzânia, a noroeste com o Malawi e a Zâmbia e a oeste com o Zimbábue e a África do Sul. A leste, Moçambique é banhado pelo Oceano Índico, ao longo de uma costa com cerca de 2.700 km, proporcionando acesso estratégico a rotas comerciais marítimas internacionais (Hoguane, 2007; INE, 2020; Bento *et al.*, 2023). O país está subdividido em três regiões: a região sul, que engloba as províncias de Maputo, Gaza e Inhambane; a região central, que compreende as províncias de Sofala, Manica, Zambézia e Tete; e a região norte, que inclui Nampula, Cabo Delgado e Niassa, num total de 10 províncias (Bento *et al.*, 2023) (Figura 1).

Figura 8 - Localização de Moçambique e localização geográfica dos centroides de cada província.



Preparado por Matheus Rodrigues Raniero (2025)
Geographic Coordinate System, Datum SIRGAS 2000

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima de Moçambique é caracterizado por uma variação espacial significativa, influenciada por fatores geográficos e meteorológicos, com a predominância do Oceano Índico (Ferrier; Ruppel, 2025). O interior do sul de Moçambique é classificado como clima árido e semiárido quente (BWh e BSh) enquanto o centro e norte são predominantemente classificados como clima subtropical úmido (Cwa e Cwb), com inverno seco (Hoguane, 2007; Ferrier; Ruppel, 2025). A vasta costa do país e uma parte da região norte é dominada pelo clima tropical de savana úmida (Aw) (Hoguane, 2007; Ferrier; Ruppel, 2025). O país apresenta duas estações bem definidas: a estação chuvosa e quente, que se concentra entre novembro e maio, período em que ocorre a maior parte da precipitação anual, com valores aproximados de 1200 mm, e a estação seca e fria, entre abril e outubro (Manhique *et al.*, 2023).

A temperatura média anual apresenta variações latitudinais e topográficas. No Sul, as temperaturas médias anuais situam-se em torno dos 23 °C, enquanto no norte, especialmente nas áreas costeiras, a média anual é de 26 °C. A região Centro, que abrange províncias como Sofala, Manica e Zambézia, apresenta uma variação média anual entre 24°C e 25°C, com oscilações influenciadas pela altitude e pela proximidade ao Oceano Índico.

2.2.2 Fonte de Dados Climáticos

Para este estudo, foram utilizados dois conjuntos de dados geoespaciais: o *ERA5-Land*, produzido pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF), e o *CHIRPS*, desenvolvido pelo *Climate Hazards Group*. Ambos fornecem séries temporais consistentes para análise climática. O *ERA5-Land* disponibiliza dados de temperatura do ar com resolução horária, cobrindo o período de 1 de janeiro de 1950 até ao presente. O *CHIRPS*, por outro lado, disponibiliza dados de precipitação diária acumulada com resolução espacial de 0,05°, cobrindo o intervalo de 1981 até ao presente.

Após a aquisição, os dados horários de temperatura do ar do *ERA5-Land* foram convertidos de Kelvin (K) para graus Celsius (°C), e a média diária foi calculada para padronização da série temporal. Já os dados de precipitação do *CHIRPS*, originalmente disponibilizados em escala diária, foram extraídos e organizados sem necessidade de conversão adicional (Tabela 1).

Tabela 4 - Dados meteorológicos geoespaciais utilizados no estudo.

Fonte	Descrição	Unidade	Resolução	Índice
ERA5 - Land	Temperatura do ar a 2 m acima da superfície	°C	1 hora (0,1°)	E5T
CHIRPS	Precipitação diária acumulada	mm	1 dia (0,05°)	CTP

O conjunto de dados adquirido utiliza a latitude e a longitude de centroides como coordenadas geográficas de cada província de Moçambique. O centroide é determinado através da intersecção de linhas de equilíbrio, que consideram tanto as coordenadas geométricas como os valores internos do polígono, aumentando assim a precisão em áreas não homogéneas e representando todo o polígono com maior

precisão (Ni *et al.*, 2022). Neste estudo, as coordenadas dos centroides foram obtidas a partir da plataforma QGIS, através da utilização de *shapefiles* que representam os limites das províncias. A plataforma QGIS permite a implementação de diversos algoritmos matemáticos, garantindo assim a consistência e a confiabilidade na obtenção do centroide para um determinado polígono (Tabela 2). Os centroides já foram utilizados para analisar os padrões regionais de precipitação e suas mudanças na China, demonstrando sua aplicação em estudos climáticos, destacando a eficácia do método na compreensão dos regimes hidrológicos e da gestão regional dos recursos hídricos (Yu-Song *et al.*, 2024).

Tabela 5 - Informações geográficas de centroides de cada província de Moçambique.

Região	Província	Latitude	Longitude
Sul	Maputo	-25,5275	32,4501
	Inhambane	-22,8088	34,5146
	Gaza	-23,3206	32,8041
Centro	Sofala	-19,0619	34,6753
	Manica	-19,0204	33,4290
	Zambézia	-16,6513	36,9831
	Tete	-15,5148	32,7668
Norte	Nampula	-14,9648	39,2477
	Cabo Delgado	-12,4586	39,3666
	Niassa	-13,0604	36,4651

2.2.3 Cálculo do Balanço Hídrico

Procedeu-se ao cálculo das variáveis de ETP e ETR, de DEF e EXC, bem como ao estudo da capacidade de armazenamento de água no solo (ARM). Para o efeito, foram utilizados dados médios mensais de temperatura, ar e precipitação pluviométrica. O método implementado neste estudo foi de Thornthwaite e Mather (1955), devido à sua facilidade de aplicação e à disponibilidade de dados atmosféricos de entrada. O BHC foi obtido por intermédio do programa BHnorm, sugerido por Rolim, *et al.* (1998), em folha de cálculo Excel®, o qual depende da ETP (Equação 3), determinada pelo método de Thornthwaite (1948) e da capacidade de armazenamento de água disponível no solo (CAD) de 100 mm. Este valor da CAD supre as necessidades hídricas de diversas culturas perenes na região estudada (Abreu; Tonello, 2016). Com o propósito de realizar uma análise mais apurada, os resultados do balanço hídrico foram examinados não só por província, como também por região e por estações do ano.

$$ETP = 16. \left(10. \frac{T}{I}\right)^a \quad (4)$$

Em que T representa a temperatura média mensal em °C; e a letra I, por sua vez, é determinada pela equação 5, corresponde ao nível de calor da região. Este nível de calor depende da variação anual da temperatura, incorporando o efeito térmico mensal, e o expoente "a" é uma função de "I" calculável pela Equação 6 (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002).

$$I = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (5)$$

$$a = 0,675. 10^{-6}. I^3 - 0,771. 10^{-4}. I^2 + 1,792. 10^{-2}. I + 0,49239 \quad (6)$$

O valor de ETP corresponde à evapotranspiração total do mês nas condições térmicas padrão de 30 dias e um fotoperíodo (N) diário de 12 horas. Deste modo, a equação 7 permite calcular a ETP corrigida (COR) em função de N e do número de dias do período (NDP).

$$COR = \left(\frac{N}{12}\right) \cdot \left(\frac{NDP}{30}\right) \quad (7)$$

A determinação da ETR, isto é, aquela que decorre em função da disponibilidade hídrica no solo, é influenciada por dois cenários distintos. O primeiro cenário, quando $P - ETP \geq 0$, implicado que a ERP é igual a ETR. O segundo cenário, quando $ALT \leq 0$, a ETR é calculada com base na alteração do armazenamento de água no solo (ALT) (Equações 8).

$$ETR = P + |ALT| \quad (8)$$

A alteração do armazenamento de água no solo (ALT) é calculada pela diferença entre ARM do mês em questão e o ARM do mês anterior. E ARM é obtido pela Equação 9.

$$ARM = CAD \cdot e^{\left(\frac{NEG ACUM}{CAD}\right)} \quad (9)$$

$$NEG ACUM = CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad (10)$$

Em que CAD é a capacidade de armazenamento água disponível no solo (mm); e NEG ACUM é o negativo acumulado (mm) obtido primeiramente pela diferença P – ETP negativo; e a posterior calculado pela equação 10.

O excedente hídrico foi obtido por meio da equação 11 em que, onde EXC é excedente hídrico dado em mm, P é a precipitação (mm), ETP é a evapotranspiração potencial (mm) e ALT é a alteração do armazenamento de água no solo (mm).

$$EXC = (P - ETP) - ALT \quad (11)$$

Por fim, a DEF foi obtida pela equação 12, em que DEF representa a deficiência hídrica em (mm) e ETR a evapotranspiração real (mm).

$$DEF = ETP - ETR \quad (12)$$

2.2.4 Análise Decenal do Balanço Hídrico

Com o objetivo de identificar padrões estruturais e reduzir a influência das variações interanuais, as variáveis mensais do balanço hídrico (precipitação, ETP, ETR, DEF e EXC) foram agregadas em períodos decenais: 1994-2003, 2004-2013 e 2014-2023. A abordagem decenal permite observar tendências climatológicas de médio prazo, facilitando a distinção entre variações de curto prazo e mudanças sistêmicas associadas ao aquecimento global ou oscilações climáticas multidecádicas como El Niño-Oscilação Sul (ENSO) e a Oscilação Decadal do Índico (IOD).

A escolha do intervalo decenal é justificada por sua aderência as práticas recomendadas em climatologia para análise de tendências hidrológicas, conforme evidenciado por estudos prévios (Rodell *et al.*, 2018; Yu-Song *et al.*, 2024), sendo especialmente útil em regiões tropicais marcadas por forte sazonalidade.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

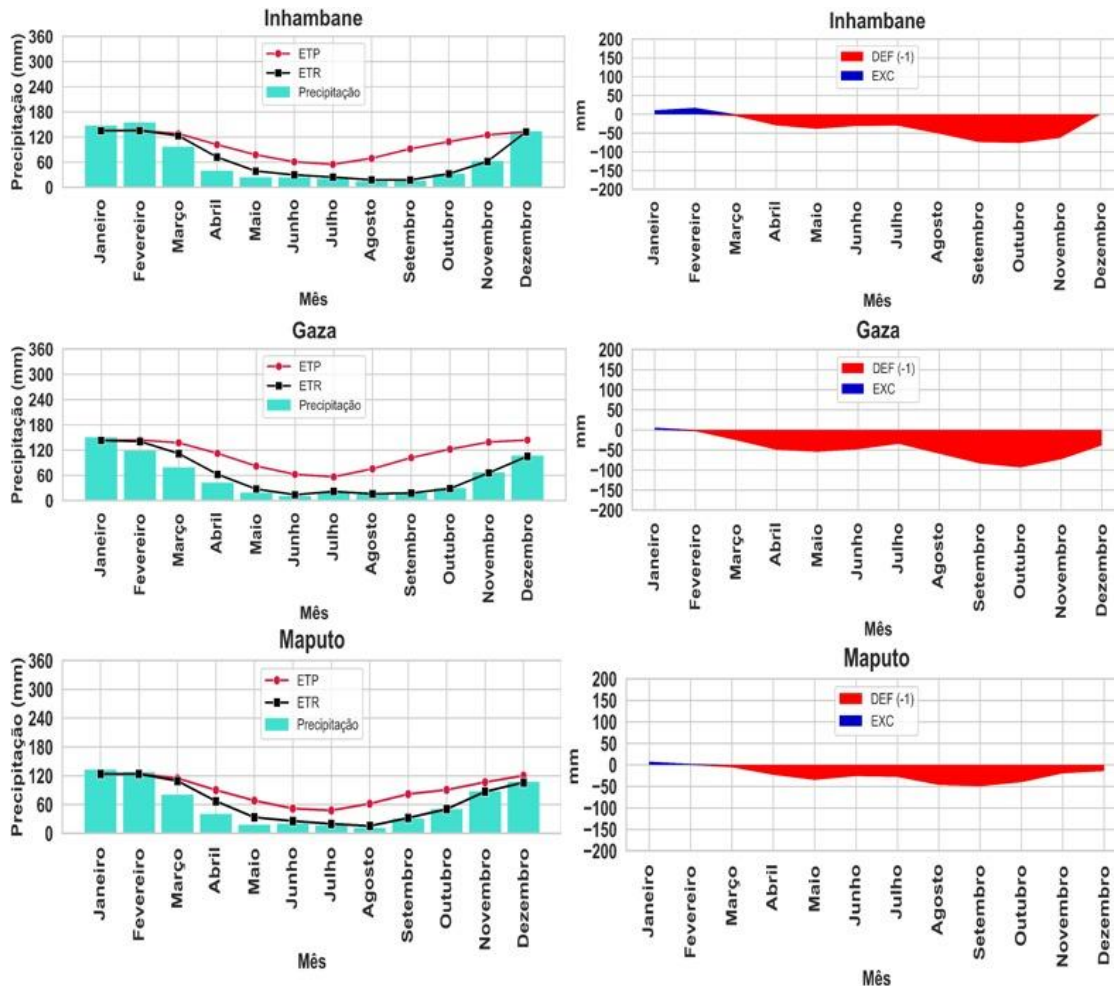
2.3.1 Análise do Balanço hídrico Climatológico anual em Moçambique

A análise da precipitação, da evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), bem como o balanço hídrico (deficiência e excedente hídrico) nas províncias de Moçambique nas três regiões, foi efetuada com base em 30 anos (1994-2023) de dados geoespaciais (*ERA5-Land* e CHIRPS). A análise de cada região por província, seguida de uma comparação entre as províncias e uma discussão sobre as implicações para o manejo hídrico e agrícola, e, por fim, uma conclusão comparativa das regiões e de Moçambique em geral, é apresentada em seguida.

A análise foi feita através de gráficos de precipitação e evapotranspiração, esta última representando a perda de água do solo e da vegetação para a atmosfera. A evapotranspiração foi considerada em suas duas formas: ETP, determinada exclusivamente por variáveis meteorológicas, e ETR, que depende da disponibilidade hídrica no solo. Além disso, foram elaborados gráficos do balanço hídrico, resultante da interação entre precipitação, ETP e ETR, evidenciando períodos da DEF, quando a demanda evapotranspirativa supera a oferta de água no solo, e de EXC, quando a precipitação excede a capacidade de armazenamento hídrico do solo.

A Figura 9 apresenta os gráficos referentes a dados mensais de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) para as províncias de Maputo, Gaza, e Inhambane, em Moçambique, no período de 30 anos (1994 – 2023).

Figura 9 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região sul de Moçambique (Maputo, Gaza e Inhambane) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação.



A província de Maputo apresenta uma variabilidade na precipitação ao longo do ano, com máximos notáveis nos meses de janeiro (131,4 mm) e dezembro (105,8 mm). Em contraste, os meses de maio a agosto apresentam precipitação muito baixa, com valores inferiores a 20 mm.

A ETP segue um padrão sazonal, com os valores mais elevados em janeiro (123,6 mm) e dezembro (120,4 mm), enquanto a ETR exibe valores consistentes com a ETP durante os meses chuvosos e uma diminuição acentuada nos meses secos, particularmente de maio a agosto. O balanço hídrico de Maputo é caracterizado por uma DEF considerável em maio e junho, com valores superiores a 25 mm, indicando uma escassez de água disponível no solo durante esses meses. Nos meses de janeiro

a março, observa-se um EXC, com valores de 7,8 mm em janeiro e 2,5 mm em fevereiro.

Em Gaza, os valores de precipitação são substancialmente mais elevados no início do ano, com os meses de janeiro (148,9 mm) e fevereiro (116,9 mm) a apresentarem os maiores volumes. A ETP atinge o seu máximo em janeiro (143,1 mm), decrescendo ao longo do ano.

A ETR segue um padrão semelhante, com máximos em janeiro e fevereiro, mas apresenta uma redução substancial a partir de abril. A província de Gaza apresenta uma DEF mais acentuada durante os meses de abril a outubro, com deficiências mensais superiores a 40 mm. A partir de novembro, observa-se um aumento da precipitação, reduzindo a DEF e resultando em um excedente de 73,2 mm. O mês de maio apresenta a maior deficiência (54,7 mm), indicando uma escassez significativa de água no solo durante esse período.

Em Inhambane, a precipitação apresenta uma distribuição mais uniforme ao longo do ano, com máximos significativos em janeiro (146,0 mm) e fevereiro (153,0 mm). A evapotranspiração potencial também segue um padrão sazonal, atingindo o seu maior valor em janeiro (135,2 mm) e apresentando valores progressivamente mais baixos durante o resto do ano. A evapotranspiração real apresenta um padrão semelhante ao da ETP, com os valores mais elevados nos meses chuvosos. O balanço hídrico de Inhambane é caracterizado por deficiências mais suaves em comparação com os de Gaza, com valores de deficiências inferiores a 40 mm nos meses secos. No entanto, os meses de janeiro, fevereiro e março apresentam um excedente hídrico, especialmente em fevereiro, com um excedente de 17,3 mm.

De um modo geral, as três províncias reafirmam a ocorrência de duas estações distintas: a chuvosa, que se verifica entre novembro e março, e a estação seca, que decorre entre abril e outubro. No entanto, as diferenças entre elas são notórias tanto nos volumes de precipitação como nos valores de ETP e ETR. Nos primeiros dois meses do ano, as três províncias apresentam algum nível de EXC, embora com intensidades diferentes que varia entre 2,3 mm e 17,3 mm. As maiores deficiências hídricas foram observadas em Gaza, com valores superiores a 45 mm, enquanto Maputo e Inhambane apresentam deficiências mais moderadas (abaixo de 45 mm).

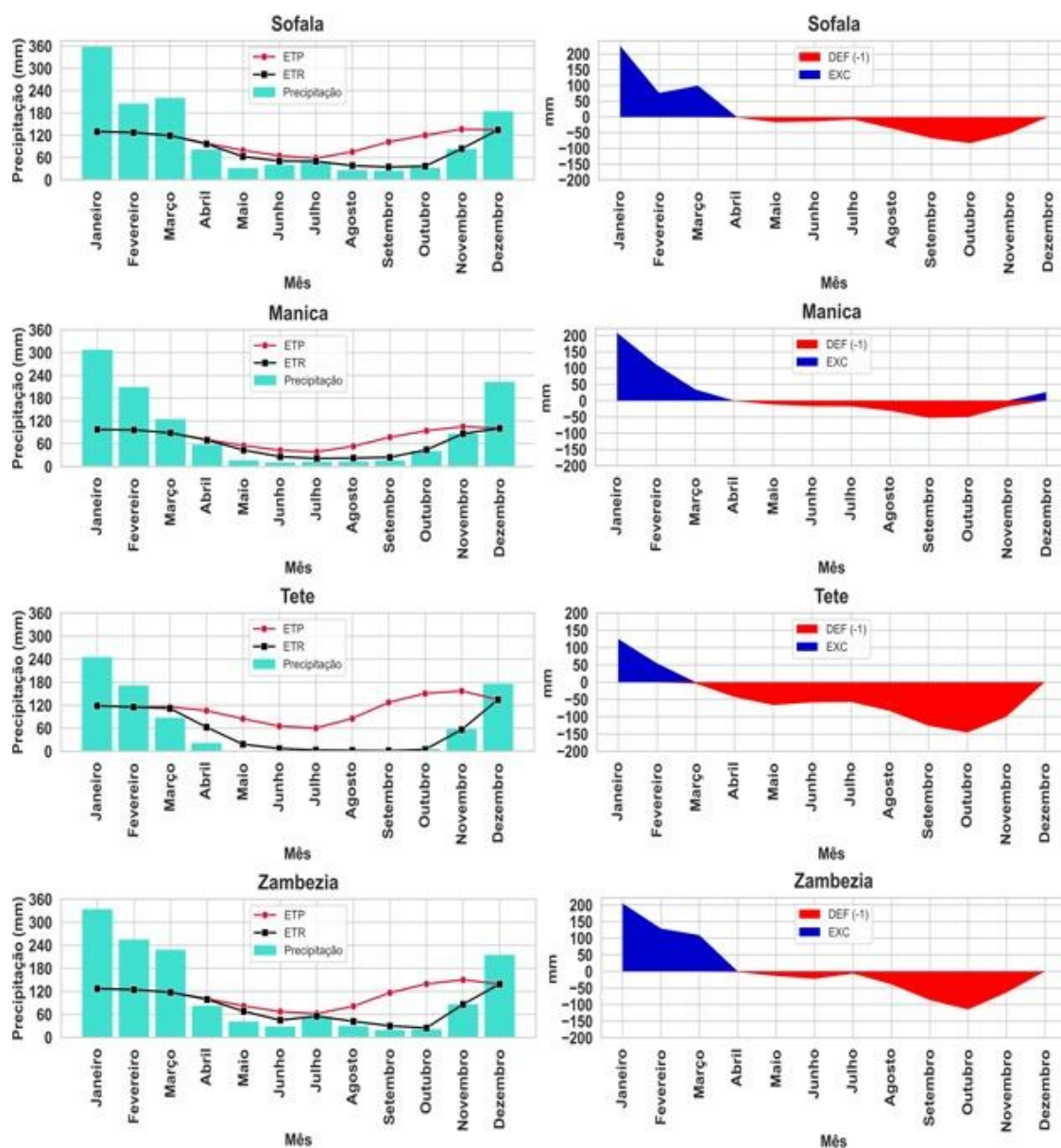
O balanço hídrico em Maputo e Inhambane é mais equilibrado, com deficiências mínimas nos meses mais secos e excedentes moderados nos meses mais chuvosos. Gaza, por outro lado, apresenta deficiências significativas na estação seca,

especialmente de abril a outubro, o que indica uma maior vulnerabilidade em termos de recursos hídricos.

A gestão agrícola na região sul, pode se beneficiar de uma abordagem de manejo da água mais sustentável, através da implementação de sistemas de irrigação que complementem os períodos de DEF, especialmente de maio a agosto, em particular nas províncias de Maputo e Inhambane. A província de Gaza, onde a DEF é mais acentuada, a implementação de técnicas de armazenamento de água, como a construção de reservatórios ou o recurso de técnicas de captação de água da chuva, é crucial para assegurar a disponibilidade de água durante a estação seca. Além disso, a seleção de culturas mais resistentes à seca pode constituir uma estratégia eficaz para mitigar os efeitos da escassez hídrica.

São apresentados na Figura 10 gráficos referentes a dados mensais de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) para as províncias de Sofala, Manica, Tete e Zambézia, em Moçambique, no período de 30 anos (1994 – 2023).

Figura 10 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região centro de Moçambique (Sofala, Manica Zambézia e Tete) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação.



A província de Sofala demonstra uma alta variabilidade na precipitação ao longo do ano, com os valores máximos observados em janeiro (356,0 mm) e uma redução substancial durante a estação seca, com o valor mais baixo observado em agosto (24,7 mm). A ETP, por sua vez, apresenta um padrão sazonal, com valores mais elevados na estação chuvosa, como em janeiro (130,0 mm) e dezembro (134,4 mm). E ETR apresenta uma redução significativa nos meses de precipitação mais baixa, como junho e julho, com 50,5 mm e 50,2 mm, respectivamente. A DEF é notável

em maio (16,8 mm), junho (14,4 mm) e julho (8,3 mm), enquanto o EXC atinge o seu valor máximo em janeiro (226,0 mm), devido à elevada precipitação no início do ano.

Manica apresenta uma precipitação considerável durante a estação chuvosa, com valores máximos observados em janeiro (306,3 mm) e dezembro (221,6 mm). Durante a estação seca, a precipitação diminui, com os valores mais baixos registados em maio (14,8 mm) e junho (9,3 mm). A ETP apresenta uma estabilidade relativa ao longo do ano, com valores que variam de 42,6 mm em junho a 105,0 mm em novembro. Em Manica a ETR segue o padrão da ETP, mas com uma variação menor, limitada pela disponibilidade de água. A DEF, segue o mesmo padrão de Sofala, atingindo os valores mais baixos em junho e julho, com 16,9 mm e 17,5 mm, respectivamente, enquanto o excedente hídrico (EXC) atinge o seu valor mais alto em janeiro (208,9 mm).

A província de Tete, que se caracteriza por apresentar um clima mais árido, evidencia uma precipitação bastante concentrada na estação chuvosa/quente, com máximos de 243,7 mm em janeiro e 174,2 mm em dezembro. A ETP apresenta uma variação sazonal mais acentuada, atingindo valores mais elevados de 118,4 mm em janeiro e 150,5 mm em outubro. A ETR, por sua vez, apresenta uma grande diferença em relação à ETP, especialmente em meses com pouca precipitação, como junho (6,9 mm) e julho (3,2 mm). A DEF é acentuada da região, com valores elevados, como 66,4 mm em maio e 57,2 mm em julho, enquanto o EXC é mais acentuado no início da estação chuvosa, como em janeiro (125,2 mm) e novembro (100,7 mm).

A Zambézia, apresenta uma precipitação considerável ao longo do ano, com os meses de maior precipitação a serem em janeiro (332,5 mm) e fevereiro (253,7 mm). A ETP é semelhante à de outras províncias da região centro, com os valores mais altos a ocorrerem no final da estação chuvosa, como em novembro (150,0 mm) e dezembro (139,0 mm). A ETR mostra-se bem ajustada à ETP, refletindo uma evapotranspiração eficiente nos meses mais chuvosos e secos. A DEF é maior no final da estação chuvosa, com valores significativos em maio (13,8 mm) e junho (22,3 mm), e o EXC apresenta valores mais elevados no início do ano, com o valor mais alto em janeiro (205,3 mm).

Em todas as províncias, foram observados máximos de precipitação superiores a 200 mm em janeiro e fevereiro, seguidos por quedas significativas, principalmente na estação seca. A província de Sofala apresenta a maior precipitação em janeiro, excedendo os 350 mm, enquanto Manica e Zambézia registram valores máximos de

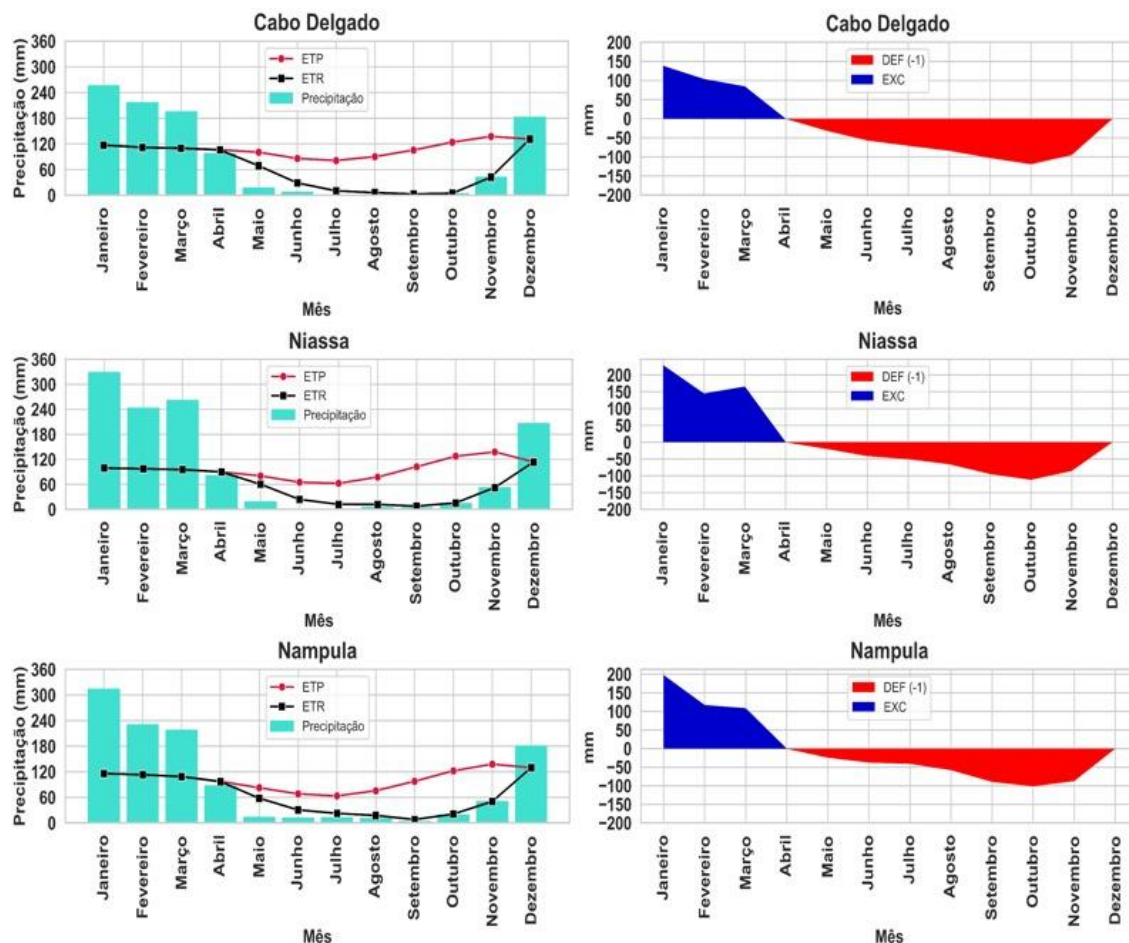
306,3 mm e 332,5 mm, respectivamente. Tete, por outro lado, apresenta a menor precipitação anual, principalmente na estação chuvosa. A ETP mostra tendência semelhante em todas as províncias, com máximas durante a estação chuvosa, e a ETR apresenta uma variabilidade, particularmente em Tete, onde diminui drasticamente nos meses secos, indicando disponibilidade hídrica limitada. O balanço hídrico é mais favorável em Sofala, Manica e Zambézia, que apresentam melhores condições de retenção de umidade, ao contrário do que se verifica em Tete, que apresentam maior DEF, principalmente durante os meses secos, sugerindo uma maior vulnerabilidade à escassez hídrica.

O manejo hídrico e agrícola nas províncias da região centro de Moçambique deve ser adaptado às condições climáticas e ao balanço hídrico específico de cada área. Para Sofala e Zambézia, que apresentam excedentes hídricos significativos, é necessário implementar estratégias de armazenamento de água para utilização durante os períodos secos, bem como adotar práticas de gestão sustentável da água para evitar o desperdício durante a estação chuvosa. A gestão dos recursos hídricos em Tete e Manica deve se concentrar no aumento da retenção de água, recorrendo as tecnologias de irrigação eficientes e estratégias de conservação do solo para reduzir o impacto da seca. A agricultura nessas províncias deve ser adaptada a essas condições, com foco no uso de culturas mais resistentes à seca e na adoção de práticas agrícolas sustentáveis que conservem a umidade do solo. Sistemas de monitoramento de precipitação e evapotranspiração são imprescindíveis para otimizar a gestão dos recursos hídricos e mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas na agricultura.

A Figura 11 apresenta os gráficos referentes a dados mensais de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) para as províncias de Nampula, Niassa e Cabo Delegado, em Moçambique, no período de 30 anos (1994 – 2023).

Figura 11 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região norte de Moçambique (Sofala, Manica Zambézia e Tete) DEF:

Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação.



A província de Nampula apresenta uma variação significativa na precipitação anual, com máximos durante o período chuvoso, que ocorre entre novembro a março. O mês de janeiro registou o maior índice de precipitação, com 313,6 mm, enquanto setembro foi o mês com menor precipitação, com apenas 3,1 mm. A evapotranspiração potencial (ETP) apresenta um padrão sazonal, com valores mais elevados a ocorrer entre outubro e março, atingindo um máximo em novembro (137,8 mm). A evapotranspiração real (ETR) segue um padrão semelhante ao da ETP, com os maiores níveis a ocorrer nos meses de precipitação mais intensa, embora com uma intensidade reduzida. A diferença entre a ETP e a ETR é particularmente notável nos meses de seca, como julho e agosto, com a ETR a atingir os 22,3 mm e 17,5 mm, respectivamente, enquanto a ETP se mantém relativamente elevada (63,3 mm e 75,5 mm). A DEF atinge valores mais elevados nos meses de seca, com um máximo de

89,6 mm em setembro, enquanto o EXC se mantém positivo, sobretudo entre janeiro e março, atingindo um máximo de 197,9 mm em janeiro.

Cabo Delgado apresenta um padrão de precipitação semelhante ao de Nampula, com máximos significativos nos meses de janeiro a março (255,8 mm, 215,8 mm e 194,6 mm, respectivamente), seguidos por uma queda acentuada durante o período de seca. A precipitação mais baixa ocorre em julho, com apenas 0,3 mm. A evapotranspiração potencial (ETP) na província de Cabo Delgado segue a mesma tendência sazonal observada em Nampula, com os maiores valores a serem registrados em novembro (137,5 mm) e os menores em junho (85,9 mm). A evapotranspiração real (ETR) é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica, apresentando valores mais baixos durante os meses secos (10,3 mm em julho), refletindo a escassez de recursos hídricos. O déficit hídrico é elevado durante os meses de seca, atingindo um máximo de 70,9 mm em julho, enquanto o excedente hídrico é nulo na maior parte do ano.

Em Niassa, os dados de precipitação indicam uma tendência análoga à observada em Nampula, com um máximo de precipitação de 328,3 mm em janeiro. No entanto, Niassa apresenta valores ligeiramente mais elevados de precipitação ao longo de todo o ano, o que resulta numa DEF menos acentuada em comparação com Nampula e Cabo Delgado. A ETP segue o padrão sazonal das outras províncias, com os maiores valores registrados em novembro (137,8 mm) e os menores em junho (65,2 mm). A ETR em Niassa também segue essa tendência, mas a diferença entre ETP e ETR é mais acentuada durante os meses secos, com a deficiência hídrica a atingir um valor máximo de 50,4 mm em julho. O EXC na província é mais evidente no início da estação chuvosa, com valores de 229,2 mm em janeiro, refletindo a maior disponibilidade de água durante os meses chuvosos.

As províncias da região norte exibem um padrão sazonal claro de precipitação, ETP, ETR e balanço hídrico, caracterizados pelo aumento da precipitação de novembro a março e um declínio de maio a agosto. Notavelmente, Niassa registra a maior precipitação entre as províncias, com menores níveis de DEF durante a estação seca em comparação com Nampula e Cabo Delgado. Essa precipitação elevada em Niassa resulta em um EXC favorável, para gestão de recursos hídricos e a agricultura na estação chuvosa. Por outro lado, Cabo Delgado enfrenta uma deficiência hídrica significativa, particularmente em julho, com valores de DEF atingindo 70,9 mm, colocando desafios para a gestão agrícola e hídrica. Nampula, mostrou a maior DEF

de até 89,6 mm em setembro durante a estação seca, enquanto o excedente hídrico é observado na estação chuvosa, chegando a 197,9 mm em janeiro, destacando a alta variabilidade hídrica mensal e a capacidade limitada de armazenamento e aproveitamento hídrica durante os períodos secos.

A comparação inter-regional entre o Sul, Centro e Norte de Moçambique revela padrões climáticos distintos em termos de precipitação e temperatura ao longo das últimas três décadas. As províncias do Sul (Maputo, Gaza e Inhambane) apresentaram os menores volumes médios de precipitação anual, com valores entre 660 e 750 mm, acompanhados de temperaturas médias elevadas e variabilidade interanual acentuada, o que evidencia maior vulnerabilidade à seca. No Centro (Manica, Sofala, Tete e Zambézia), as médias de precipitação foram mais elevadas e estáveis, superando os 1100 mm em algumas províncias, com padrões térmicos mais equilibrados. Esta região demonstrou resiliência relativa às anomalias hídricas, embora Tete se destaque pelo clima mais quente e seco. Já no Norte (Cabo Delgado, Niassa e Nampula), os volumes pluviométricos mantiveram-se acima de 1000 mm, com menores amplitudes de variabilidade interanual e temperaturas levemente inferiores às do Sul, indicando maior estabilidade hidrológica. Esses achados corroboram a sazonalidade já estabelecida na literatura, com época chuvosa de novembro a março e estação seca de abril a outubro (Manhique *et al.*, 2023). Além disso, confirmam a tendência de encurtamento da estação chuvosa e intensificação das secas, como discutido em estudos recentes (Takele *et al.*, 2023; Chongue; Nishii, 2024), sinalizando importantes implicações para a segurança hídrica e agrícola regional.

A Tabela 6, que apresenta os acumulados médios anuais de 30 anos (1994–2023) evidenciando um gradiente hídrico latitudinal em Moçambique. O Sul apresenta a menor precipitação (661,8–750,5 mm) e os maiores DEF, com Gaza a ser a província mais crítica (565,0 mm, 85,3% da precipitação). No centro, Tete destaca-se pelo DEF extremo de 685,0 mm (90,7%), enquanto Sofala e Zambézia registram os maiores EXC (401,9 mm e 443,9 mm). No Norte, Cabo Delgado exhibe o maior EXC (539,8 mm), contrastando com Niassa, onde a DEF de 561,5 mm (55,1%) indica uma elevada vulnerabilidade hídrica. O que está em conformidade com a análise das projeções de mudanças climáticas para Moçambique, prevendo que regiões como Gaza, Tete e Niassa sejam afetadas por reduções substanciais na precipitação,

especialmente durante a estação seca, com reduções de até 60% (Mavume *et al.*, 2021).

Tabela 6 - Variáveis do balanço hídrico acumulados médios anuais em Moçambique (1994 – 2023).

Região	Localidade	Precipitação (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Sul	Maputo	706,8	1082,4	794,4	288,0	10,3
	Gaza	661,8	1320,8	755,8	565,0	5,8
	Inhambane	750,5	1222,2	821,7	400,5	28,0
Centro	Sofala	1317,6	1246,2	965,0	281,3	401,9
	Manica	1100,5	919,1	719,0	200,1	381,5
	Tete	755,0	1320,6	635,6	685,0	179,9
	Zambézia	1378,7	1307,4	959,1	348,3	443,9
Norte	Nampula	1145,8	1211,1	770,8	440,3	423,8
	Niassa	1019,0	1301,8	740,2	561,5	327,4
	Cabo Delgado	1211,9	1149,5	679,7	469,8	539,8
	País	Moçambique	1004,8	1208,1	784,1	424,0

Em termos nacionais, o estudo demonstrou que a média anual da precipitação acumulada em Moçambique foi de 1004,8 mm no período entre 1994 e 2023, valor que não compensa a ETP (1208,1 mm), resultando num DEF acumulado médio de 424,0 mm (42,2%), que varia de acordo com a região do país. Em concordância com outros estudos, os baixos níveis de precipitação no sul de Moçambique, em comparação com outras regiões do país, resultam da interação entre sistemas atmosféricos que limitam o transporte de umidade para essa área. A posição meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) restringe sua influência direta sobre o sul, enquanto a intensificação da *Angola Low* favorece a convergência de umidade nas regiões centrais, reduzindo a disponibilidade de precipitação no sul (Manhique, 2008, Nash, 2017; Munday e Washington, 2017). Além disso, fatores de grande escala, como o dipolo do Oceano Índico e a Oscilação El Niño-Sul (ENSO), modulam a variabilidade climática, com eventos de El Niño geralmente associados a períodos mais secos nessa região (Manhique, 2008, Chongue; Nishii, 2024).

O valor médio anual da evapotranspiração potencial acumulado em Moçambique é de 1208,1 mm, com uma média de 100,1 mm, valores inferiores aos apresentados no modelo de balanço hídrico para a África Austral, elaborado para o

período climático de 1961-1990 (Alemaw; Chaoka, 2003). A variação da evapotranspiração média anual para os países da África Austral atingiu um máximo de 1500 mm, com uma média de 420 mm, o que demonstra uma redução de 291,9 mm (19,46%) na média acumulada anual e de 319,9 mm (76,16%). Estes valores estão em conformidade com um estudo recente realizado em KwaZulu-Natal, uma província localizada na região sudeste da África do Sul, que faz fronteira com Moçambique (Ncoyini-Manciya *et al.*, 2022). Este estudo indica uma tendência geralmente decrescente na evapotranspiração na área no período entre 1997 e 2017, apesar do fenômeno de aquecimento global, sugerindo que tendências semelhantes podem ser observadas na região sul do continente africano, que inclui Moçambique.

Os resultados evidenciam que as províncias de Gaza, Inhambane, Tete e Niassa apresentam uma DEF que varia aproximadamente entre 53,4% e 90,1% da precipitação anual disponível, indicando um balanço hídrico substancialmente negativo. O DEF persistente ao longo dos 30 anos de estudo é típico de regiões áridas e semiáridas, podendo comprometer a disponibilidade hídrica do solo, reduzir a resiliência dos ecossistemas e afetar a produtividade agrícola. Estudo prévio já projetava este cenário, principalmente para as províncias de Gaza, Tete e Niassa (Mavume *et al.*, 2021). Esta realidade de distribuição desigual impõe a necessidade de estratégias regionais distintas: na província de Gaza e em Tete, são necessárias medidas de mitigação do DEF; no centro e norte em geral, é imperativa a otimização do EXC para garantir a segurança hídrica e agrícola. A variabilidade espacial demonstra a necessidade de um planejamento hídrico integrado e de políticas adaptativas às mudanças climáticas, de modo a responder aos desafios de segurança alimentar (Jalane *et al.*, 2021; Abbas *et al.*, 2023; Mavodyo, 2023).

A análise do balanço hídrico climatológico em Moçambique, no contexto da África Austral, evidencia variações na ETR ao longo das décadas. Modelos hidrológicos distribuídos projetavam uma ETR média de 420 mm na África Austral (1961-1990), com máximos de 1500 mm (Alemaw; Chaoka, 2003). Dados recentes do presente estudo (1994-2023) indicam valores médios mais elevados em Moçambique (784,1 mm), mas com um máximo inferior (965,0 mm). Esta evidencia sugere que, embora Moçambique apresente maior ETR média em relação à região, os valores máximos recentes não atingem os extremos históricos, possivelmente devido à menor disponibilidade hídrica. Este padrão reflete a intensificação da demanda evaporativa,

associada ao aumento das temperaturas e à redução da umidade do solo, impactando a disponibilidade hídrica e agrícola.

A segurança alimentar global, particularmente na África subsaariana, onde Moçambique se insere, está bastante comprometida em virtude das mudanças climáticas (Hawkesford, 2024; Toromade *et al.*, 2024; Ukudo *et al.*, 2024). O rendimento médio do milho, que é o cereal mais produzido e consumido em Moçambique, apresenta variações significativas em função das práticas agrícolas e das condições ambientais (Mariote, 2007; Jalane *et al.*, 2021). Estudo demonstra que, embora o potencial produtivo do milho possa atingir cerca de 4,88 t/ha, o rendimento real é, em média, de aproximadamente 0,72 t/ha, representando uma redução de cerca de 85% em relação ao rendimento potencial (Macamo, 2022).

Moçambique, que faz fronteira com África do Sul e a Zâmbia, dois países cujos rendimentos médios do milho são superiores aos de Moçambique. A África do Sul apresenta uma produção média do milho que oscila entre 3,03 t/ha e 5,61 t/ha, refletindo as diferenças nas condições agroclimáticas e nas características do solo do país (Adisa *et al.*, 2018). Já na Zâmbia, o rendimento médio é de 2,4 toneladas por hectare, mas estima-se que possa atingir aproximadamente a 5,7 toneladas por hectare com melhorias no manejo e no acesso a insumos (Silva *et al.*, 2023). Em comparação com o Estado de São Paulo no Brasil, a produtividade em Moçambique é 87,6% inferior (5,8 t/ha), o que reforça a sua baixa competitividade na produção do milho (IBGE, 2024).

Com relação à disponibilidade hídrica, Moçambique apresenta uma precipitação média anual que varia entre 661,8 mm e 1378,7 mm. Na Zâmbia, a precipitação anual varia entre 800 e 1500 mm, na África do Sul a diversidade climática é notável, com valores entre 500 mm e 1200 mm, enquanto em São Paulo, as chuvas variam entre 1363 mm e 1950 mm (Spinoni *et al.*, 2015; Conway *et al.*, 2017). Esta distribuição hídrica é um fator crítico na determinação da produtividade, como é o caso do milho, pois afeta diretamente o crescimento das plantas e a fase de enchimento de grãos (Kanungo *et al.*, 2022).

A análise demonstra que, apesar de Moçambique apresentar precipitação relativamente elevada em algumas regiões, a alta ETP agrava os déficits hídricos, especialmente no sul do país, impactando diretamente a produtividade agrícola. Em comparação com os principais produtores africanos e globais, a baixa produtividade do milho em Moçambique não pode ser explicada apenas pelo regime hídrico, mas

também por limitações estruturais, como o acesso restrito a tecnologias agrícolas, irrigação insuficiente, solos degradados e baixa mecanização. Desta forma, investimentos em sistemas de irrigação e na modernização do setor agrícola são cruciais para aumentar a resiliência e a competitividade do setor agrícola moçambicano.

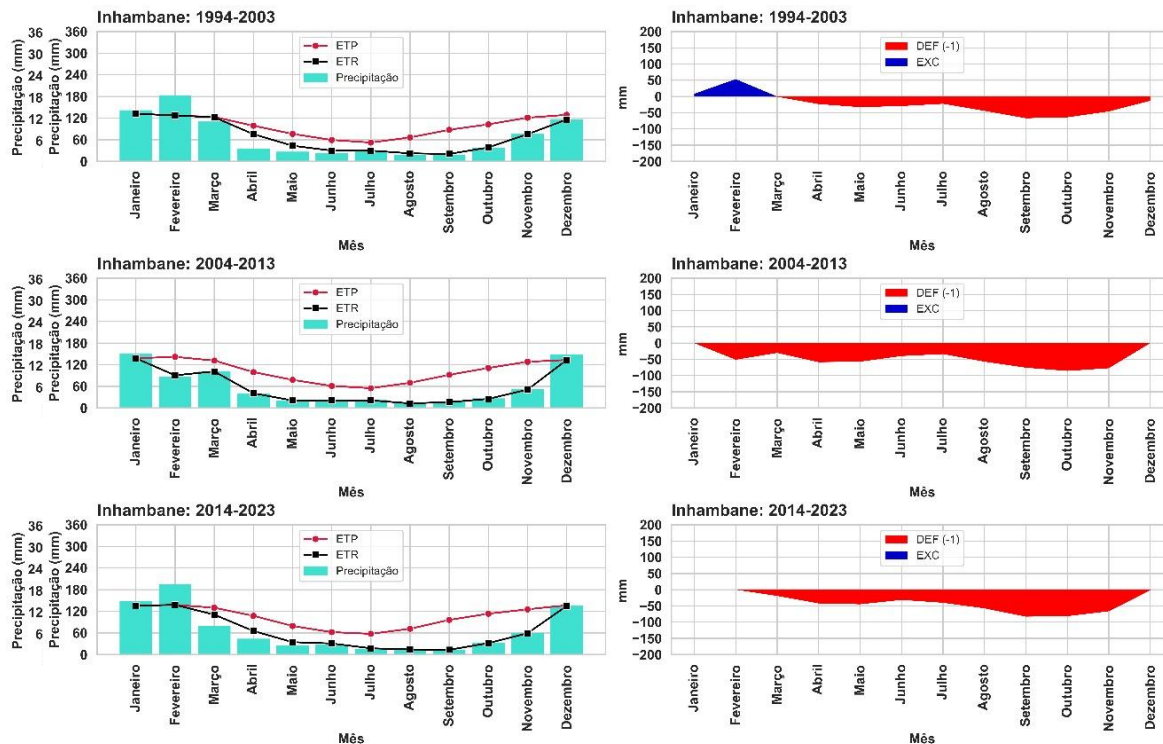
2.3.2 Análise da variabilidade hídrica decenal em Moçambique

Após a avaliação das médias mensais ao longo de 30 anos, a transição para a escala decenal, através de tabelas de resultados da análise do balanço hídrico nas províncias e por região, separadas em três décadas do período de estudo, procurou proporcionar uma visão mais abrangente das tendências hidrológicas e climáticas em cada província e em Moçambique em geral. Este enfoque reduz a influência de oscilações interanuais e realça padrões estruturais na precipitação, evapotranspiração e balanço hídrico.

A seguir, são apresentados os gráficos de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) excedente hídrica (EXC) por região com os valores acumulados de cada década. E as tabelas com o somatório anual dos valores acumulados de cada década das variáveis precipitação, ETP, ETR, DEF e EXC, por região e províncias de todo Moçambique.

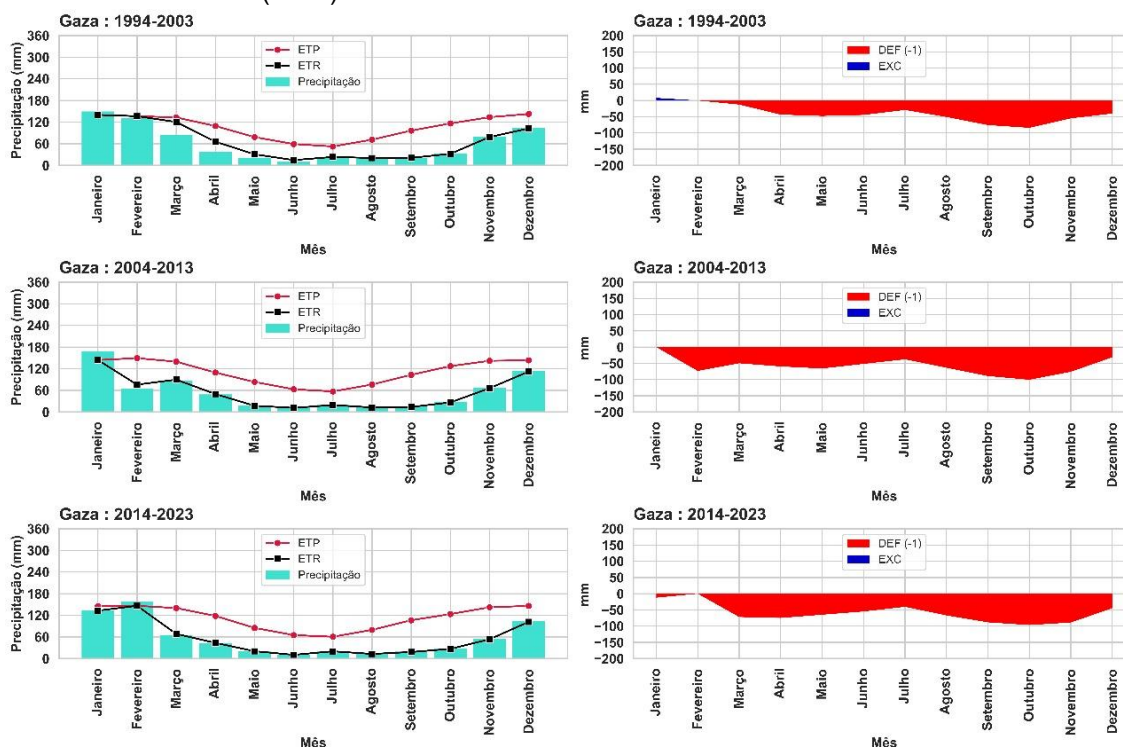
A Figura 12 apresenta os gráficos referentes ao balanço hídrico climatológico decenal na região sul de Moçambique das variáveis precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), no período de 30 anos (1994 – 2023).

Figura 12 - Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Maputo, Gaza, e Inhambane, - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação; DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico.



Fonte: Autores (2025)

Fonte: Autores (2025)



A Tabela 7 ilustra a variação decenal das variáveis do balanço hídrico nas províncias da região sul, organizando as informações por década (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023).

Tabela 7 - Variáveis do balanço hídrico na região sul por década.

Província	Década	Precipitação (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Maputo	1994-2003	736,7	1046,6	811,4	235,2	18,7
	2004-2013	666,0	1095,5	672,4	423,1	0,00
	2014-2023	717,8	1105,0	717,5	387,6	0,00
Gaza	1994-2003	693,0	1268,2	784,7	483,5	8,00
	2004-2013	637,2	1336,1	637,5	698,7	0,00
	2014-2023	655,1	1358,2	655,1	703,1	0,00
Inhambane	1994-2003	795,3	1175,5	832,2	343,4	61,9
	2004-2013	684,1	1237,9	671,3	566,6	0,00
	2014-2023	772,0	1253,2	785,6	467,6	0,00

A Figura 12 demonstra uma tendência decrescente da precipitação acumulada decenal no sul de Moçambique durante os períodos de 1994-2003, 2004-2013 e 2014-2023, com um ligeiro aumento na década mais recente. O ETR acompanha a variabilidade da precipitação durante as décadas, enquanto o ETP indica uma tendência crescente na demanda evaporativa, particularmente nos meses mais quentes, provavelmente devido ao aumento das temperaturas. Consequentemente, o DEF apresenta um aumento significativo ao longo das décadas, destacando o estresse hídrico prolongado para a vegetação e os desafios para a agricultura de sequeiro entre os meses de junho a outubro. Foi observado que o EXC, registado principalmente de janeiro a março, sofreu um declínio substancial ao longo das décadas, refletindo a diminuição até 0 mm da disponibilidade de água para recarga de aquíferos e escoamento superficial.

De acordo com a Tabela 6, a região sul de Moçambique tem evidenciado uma tendência de intensificação da aridez ao longo das últimas três décadas, caracterizada por uma redução da precipitação e um aumento contínuo da evapotranspiração

potencial (ETP). A precipitação sofreu um declínio acentuado na segunda década do período em análise, seguido de uma leve recuperação na década mais recente. Em Maputo, a precipitação diminuiu de 736,7 mm (1994-2003) para 666,0 mm (2004-2013), representando uma redução de 9,6%, antes de aumentar 7,8% na última década, atingindo 717,8 mm (2014-2023). Gaza evidenciou uma redução de 8,0% (693,0 mm - 637,2 mm) e uma recuperação marginal de 2,8% na última década (637,2 mm - 655,1 mm). Inhambane exibiu a maior oscilação, com uma queda de 14,0% (795,3 mm - 684,1 mm) seguida de um aumento de 12,9% (684,1 mm - 772,0 mm). Este comportamento sugere uma modificação no regime pluviométrico, possivelmente associada a mudanças nos padrões atmosféricos regionais e à influência de eventos climáticos extremos.

Simultaneamente, a ETP aumentou de forma contínua em todas as províncias do Sul, refletindo uma crescente demanda evaporativa da atmosfera. Em Maputo, o aumento foi de 5,6% entre a primeira e a última década (1046,6 mm - 1105,5 mm), enquanto em Gaza e Inhambane os aumentos foram de 7,1% e 6,6%, respectivamente. Este aumento na demanda evaporativa pode ser atribuído ao aumento das temperaturas médias, em conformidade com os relatórios climáticos africanos e globais que apontam para um aumento da temperatura na região do sul de África.

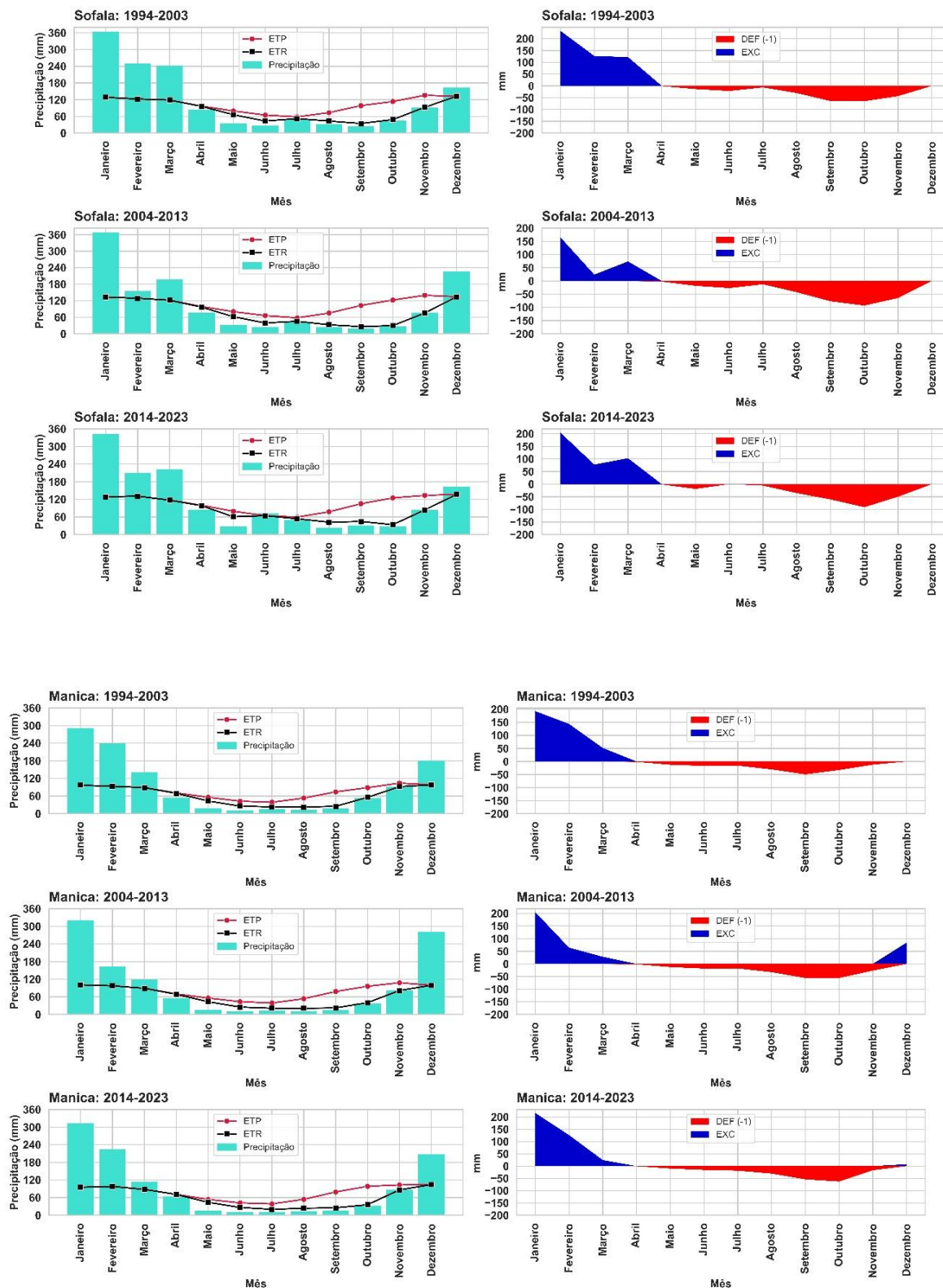
Em consequência direta, a DEF intensificou-se substancialmente, comprometendo a disponibilidade hídrica para a vegetação e a agricultura de sequeiro. Em Maputo, a DEF aumentou 80,0% na segunda década (235,2 mm - 423,1 mm), com uma ligeira redução de 8,3% na última (423,1 mm - 387,6 mm). Gaza apresentou um padrão semelhante, com um aumento de 44,6% (483,5 mm - 698,7 mm) e um acréscimo marginal de 0,6% posteriormente (698,7 mm - 703,1 mm). Em Inhambane, a DEF registou um aumento de 65,0% (343,4 mm - 566,6 mm), contudo, mostrou uma redução de 17,5% na última década (566,6 mm - 467,6 mm). O excedente hídrico (EXC), indicador fundamental da recarga de aquíferos e do escoamento superficial, praticamente desapareceu a partir de 2004, comprometendo significativamente a sustentabilidade hídrica da região. Este padrão contraria as regiões Centro e Norte, que ainda registam excedente hídrico, embora com tendência de redução.

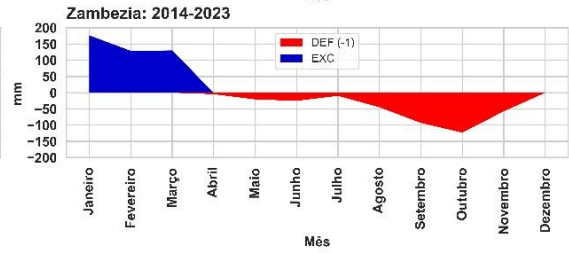
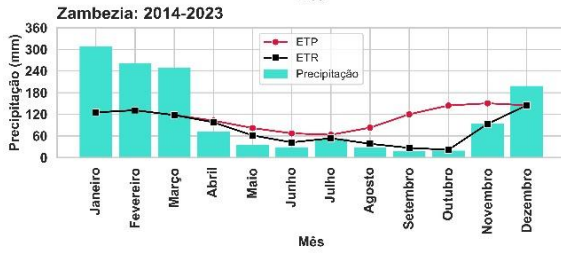
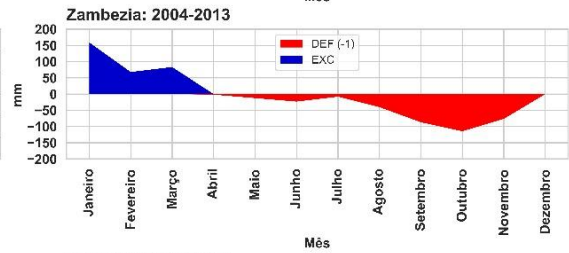
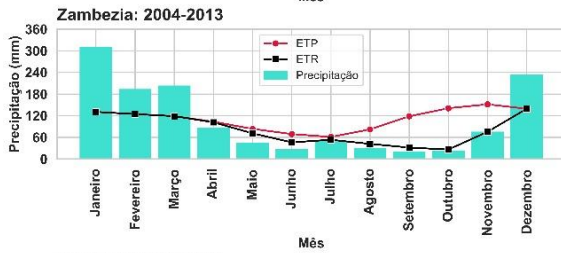
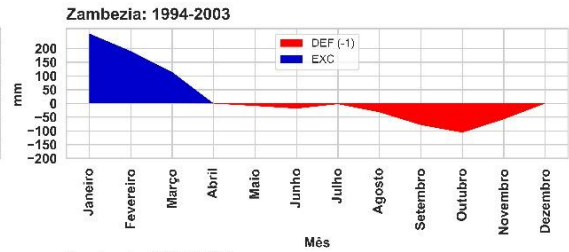
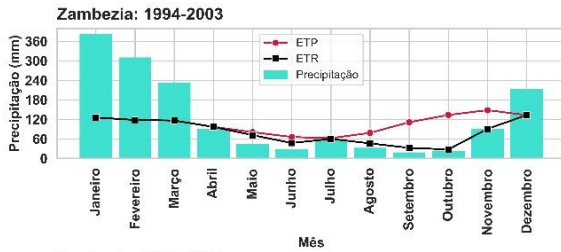
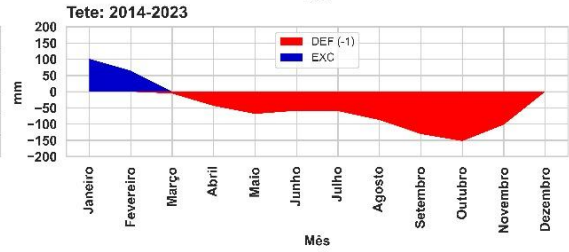
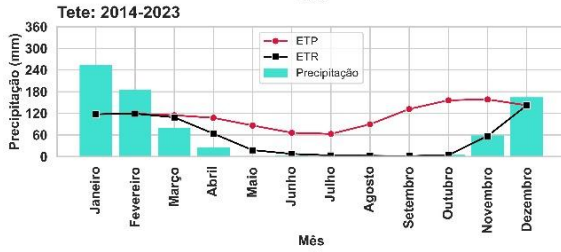
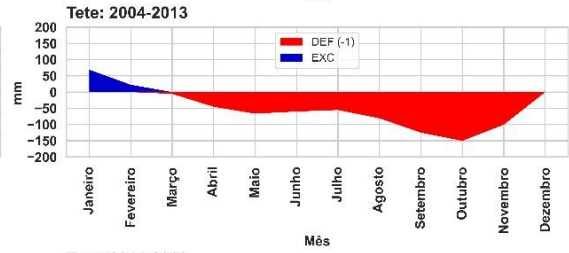
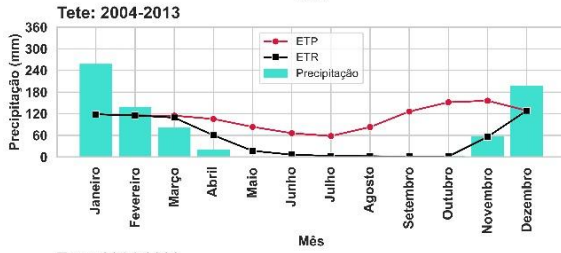
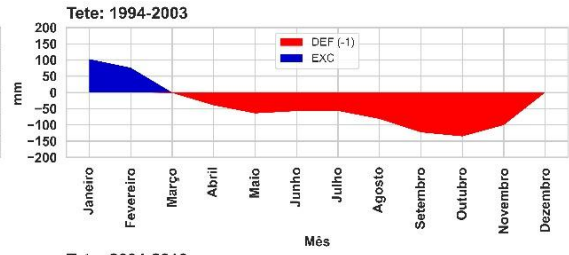
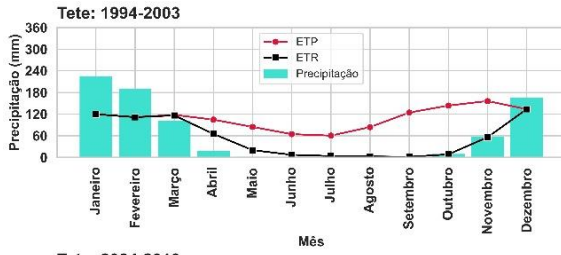
A evolução do balanço hídrico na região sul de Moçambique demonstrou um aumento progressivo da aridez, caracterizado pela redução da precipitação, pelo

aumento da demanda evaporativa e pelo conseqüente agravamento do DEF. A diminuição do EXC implica uma menor disponibilidade de água para a recarga de aquíferos, afetando negativamente a segurança hídrica e a produção agrícola (Rodell *et al.*, 2018). Entre as possíveis causas desta intensificação da aridez, destacam-se o aumento das temperaturas médias, mudanças na circulação atmosférica regional e a maior frequência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas associadas ao fenômeno El Niño. Estas mudanças reforçam a necessidade de estratégias adaptativas para a gestão dos recursos hídricos e a resiliência da agricultura na região, incluindo técnicas de conservação da umidade do solo, manejo sustentável da vegetação e investimentos em infraestruturas hídricas para o armazenamento e distribuição de água (Nelson *et al.*, 2021).

A Figura 13 apresenta os gráficos referentes ao balanço hídrico climatológico decenal na região centro de Moçambique das variáveis precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), no período de 30 anos (1994 – 2023).

Figura 13 - Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Sofala, Manica, Tete e Zambézia - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico.





A Tabela 8 mostra a variação decenal das variáveis do balanço hídrico nas províncias da região centro, organizando as informações por década (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023).

Tabela 8 - Variáveis do balanço hídrico na região centro por década.

Província	Década	Precipitação (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Sofala	1994-2003	1390,	1220,1	975,0	245,2	482,6
		2				
	2004-2013	1247,	1262,1	925,2	336,9	262,9
		5				
	2014-2023	1315,	1256,5	994,1	262,4	385,2
		1				
Manica	1994-2003	1108,	903,6	732,2	171,3	388,6
		5				
	2004-2013	1102,	929,1	708,3	220,7	381,9
		6				
	2014-2023	1090,	924,7	716,1	208,6	374,3
		4				
Tete	1994-2003	754,4	1303,9	644,6	659,3	179,3
	2004-2013	746,0	1306,3	618,0	688,3	91,6
	2014-2023	764,7	1351,5	644,2	707,3	166,4
Zambézia	1994-2003	1502,	1268,2	963,2	305,0	559,2
		2				
	2004-2013	1285,	1322,2	959,6	362,6	310,6
		2				
	2014-2023	1348,	1331,9	954,3	377,5	436,2
		9				

A região centro de Moçambique, conforme ilustrado na Figura 13 apresentou os maiores índices pluviométricos do país e revelou um regime hidrológico relativamente mais equilibrado ao longo das três décadas (1994-2003, 2004-2013 e 2014-2023). A precipitação acumulada decenal apresentou uma tendência de redução, contudo manteve-se consistentemente superior à ETP nos meses chuvosos, particularmente entre janeiro e março, refletindo uma maior disponibilidade hídrica sazonal. O balanço hídrico na região centro mostrou menores DEF em comparação com os valores de EXC, embora esses períodos de escassez hídrica se estendam de abril a dezembro, indicando um prolongamento da restrição hídrica na estação seca. O excedente hídrico (EXC) concentra-se majoritariamente nos primeiros três meses do ano, e zero em quase todos os meses restantes do ano. Esta realidade deve-se à maior altitude da região, que confere uma influência climática mais equilibrada, favorecendo uma distribuição mais uniforme das chuvas.

Conforme a Tabela 8, a região Centro de Moçambique apresenta um comportamento hidrológico heterogêneo ao longo das últimas três décadas, caracterizado por variações na precipitação e um aumento da evapotranspiração potencial (ETP), refletindo mudanças climáticas e dinâmicas atmosféricas. A precipitação anual variou significativamente entre as províncias, com reduções expressivas na Zambézia (-14,4% na segunda década, de 1502,2 mm para 1285,2 mm) e Sofala (-10,3%, de 1390,2 mm para 1247,5 mm), seguidas de uma ligeira recuperação na década mais recente. Em contraste, a província Manica apresentou uma redução discreta de 1,6% ao longo das três décadas (1108,5 mm - 1090,4 mm), enquanto Tete permaneceu relativamente estável, oscilando entre 746,0 mm e 764,7 mm, o que corresponde a 2,5% na última década. Estas variações são influenciadas por fatores como a intensificação de eventos extremos e mudanças nos padrões de circulação atmosférica sobre o canal de Moçambique.

A ETP, tal como a região sul, aumentou em todas as províncias, sugerindo um ambiente progressivamente mais árido. A maior elevação ocorreu em Tete, onde a ETP subiu de 1303,9 mm para 1351,5 mm (3,6%), indicando um aumento da demanda evaporativa, potencialmente impulsionado pelo crescimento das temperaturas médias e pela redução da umidade disponível no solo. Em Sofala e Zambézia, a ETP também aumentou, com variações de 3,0% e 5,0%, respectivamente, acompanhando a tendência observada em outras regiões do país.

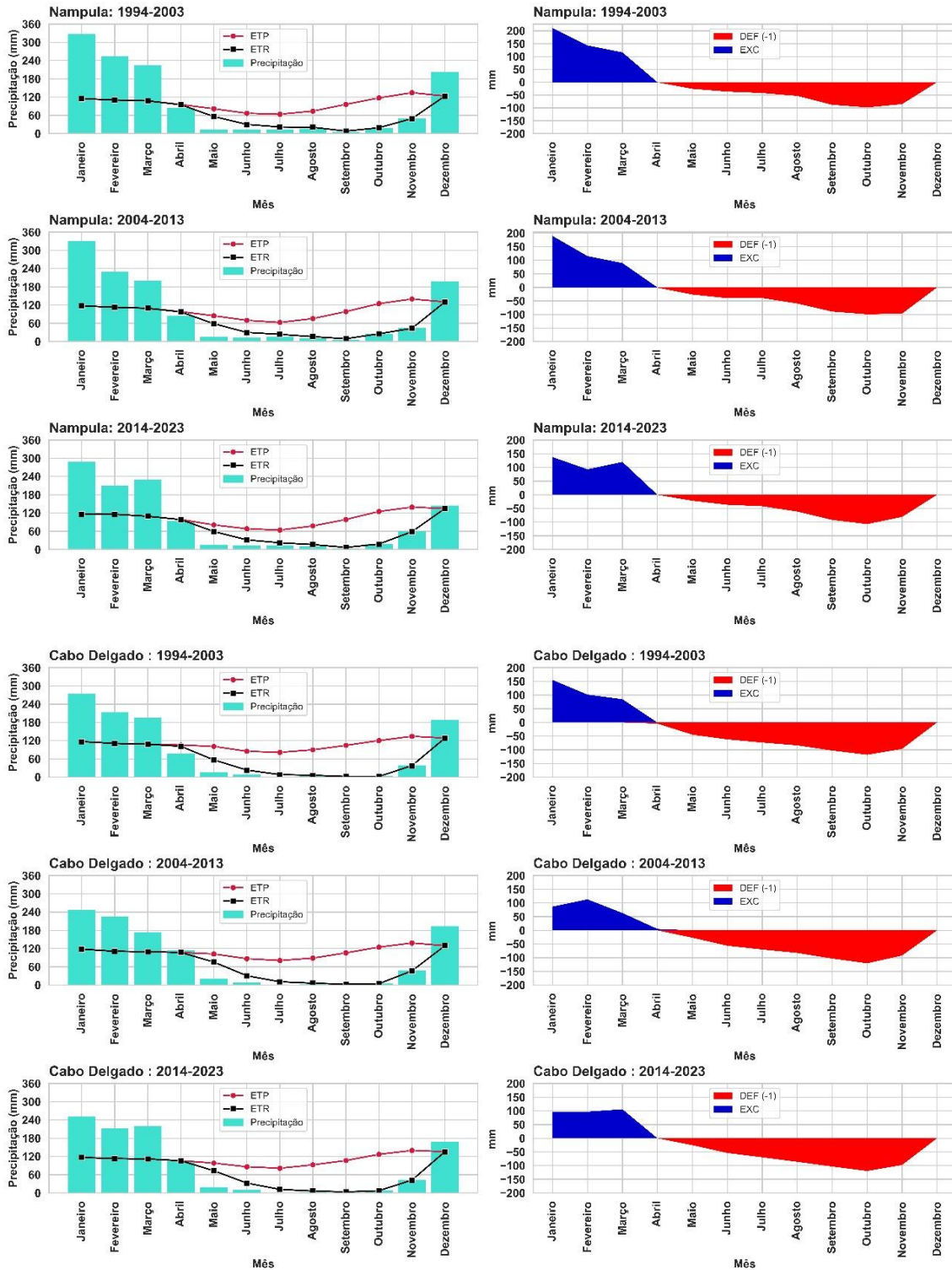
A DEF aumentou de forma generalizada, destacando-se Sofala, que apresentou um crescimento de 37,4% na segunda década (245,2 mm - 336,9 mm), embora tenha reduzido ligeiramente na última. Este padrão reflete períodos prolongados de estiagem e uma menor eficiência na reposição hídrica dos solos. O EXC exibiu um padrão de declínio progressivo, mas manteve-se presente, ao contrário do Sul. Em Sofala, observou-se uma redução de 45,5% na segunda década (482,6 mm - 262,9 mm), com recuperação parcial na última (385,2 mm). Em Zambézia, a redução acumulada foi de 22,0% entre a primeira e a última década (559,2 mm - 436,2 mm). Estas reduções indicam uma menor disponibilidade de água para a recarga dos aquíferos e para o escoamento superficial, influenciando os sistemas hídricos regionais e a sustentabilidade agrícola.

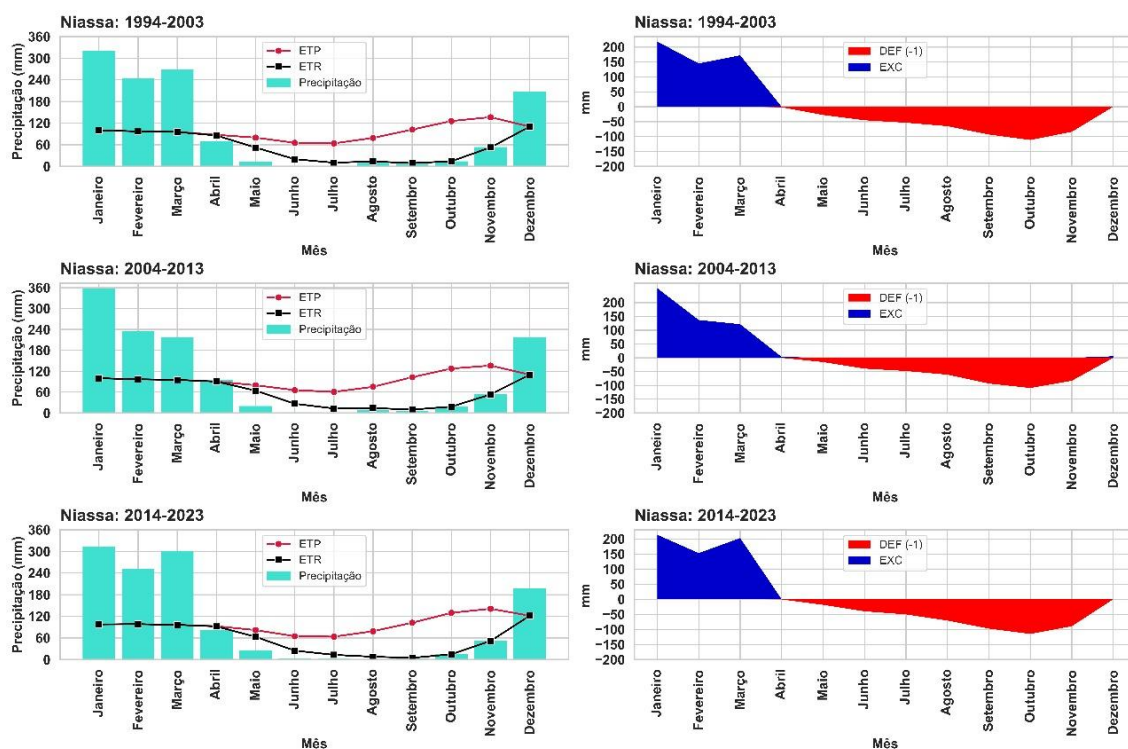
A região centro apresenta um padrão de redução da precipitação em grande parte das províncias, acompanhado por um aumento da ETP, indicando um ambiente progressivamente mais seco. Embora a DEF tenha aumentado, a presença de

excedente hídrico na maior parte da região sugere que a recarga de aquíferos ainda ocorre, embora em menor intensidade. As mudanças observadas podem ser explicadas por fatores como variações nos padrões atmosféricos sobre o Oceano Índico e o canal de Moçambique, bem como a crescente influência de fenômenos como o El Niño e o aquecimento global. Estes fatores reforçam a necessidade de estratégias de conservação da água e de gestão eficiente dos recursos hídricos, de modo a mitigar os impactos sobre a agricultura e o abastecimento urbano.

A Figura 14 apresenta os gráficos referentes ao balanço hídrico climatológico decenal na região norte de Moçambique das variáveis precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), no período de 30 anos (1994 – 2023).

Figura 14 Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Nampula, Niassa e Cabo Delgado - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico.





A Tabela 9 mostra a variação decenal das variáveis do balanço hídrico nas províncias da região norte, organizando as informações por década (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023).

Tabela 9 - Variáveis do balanço hídrico na região norte por década.

Província	Década	Precipitação (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Nampula	1994-2003	1203,0	1184,0	754,7	429,3	470,2
	2004-2013	1156,2	1222,6	772,2	450,5	395,5
	2014-2023	1078,3	1226,7	785,5	441,2	350,7
Niassa	1994-2003	1192,8	1141,4	659,7	481,8	536,2
	2004-2013	1213,5	1139,1	690,0	449,1	520,4
	2014-2023	1229,3	1167,8	685,9	481,9	568,9
Cabo Delgado	1994-2003	1004,7	1287,9	703,4	584,5	342,1
	2004-2013	1025,2	1302,7	752,3	550,4	268,7
	2014-2023	1027,0	1314,6	759,7	554,9	298,9

A Figura 14 apresenta o balanço hídrico climatológico da região norte de Moçambique, apresentando índices pluviométricos superiores que sul e levemente

inferiores que centro do país. A precipitação acumulada decenal demonstrou uma tendência de aumento com o tempo, exceto na província de Nampula, onde se observou uma redução ligeira. A ETP refletiu uma maior disponibilidade hídrica sazonal, apresentando maiores valores mais elevados nos meses chuvosos (novembro a abril) e valores reduzidos nos meses secos (maio a outubro). O DEF na região norte, semelhante ao da região centro, abrangendo toda a época seca, inclusive os meses de novembro e dezembro, mas o volume de escassez de água na região norte é superior a todo o país. De igual modo, o excedente hídrico (EXC) concentra-se majoritariamente nos primeiros três meses do ano, e zero em quase todos os restantes meses do ano. Esta realidade, além da altitude, das monções e das correntes quentes, deve-se ao deslocamento da zona de convergência intertropical favorecendo maiores volumes de disponibilidade hídrica nas províncias norte de Moçambique.

Na Tabela 9, a região Norte de Moçambique exhibe um padrão climático distinto das outras regiões, caracterizado por uma maior estabilidade na precipitação e na disponibilidade hídrica, apesar de tendências de redução do EXC e aumento da aridez. Nampula registou uma diminuição progressiva na precipitação ao longo das três décadas (-10,4%, de 1203,0 mm para 1078,3 mm), enquanto Niassa e Cabo Delgado apresentaram variações menos significativas, com Niassa de 3% e Cabo Delgado ficou praticamente estável. Estes valores refletem a influência da oscilação intertropical e de padrões atmosféricos que impactam a convergência da umidade na região.

A ETP apresentou uma trajetória ascendente, com aumentos de 3,6% em Nampula e 2,3% em Cabo Delgado, reforçando o padrão observado no restante do país. A DEF apresentou flutuações moderadas, sendo mais significativa em Nampula, onde aumentou 2,8% na última década, refletindo uma ligeira intensificação da aridez. Em Cabo Delgado, a DEF oscilou sem um padrão definido, com uma leve tendência de aumento. O EXC, por outro lado, sofreu uma redução consistente ao longo das décadas, com Nampula a registar uma queda de 25,4% (470,2 mm - 350,7 mm) e Cabo Delgado uma diminuição de 12,7% (342,1 mm - 298,9 mm). Niassa, contudo, apresentou um padrão oposto, com um aumento de 6,1% no EXC na última década (536,2 mm - 568,9 mm), o que sugere que essa província preserva um regime hidrológico relativamente mais estável.

A região Norte de Moçambique mantém um padrão hidrológico mais estável em comparação com as regiões sul e centro, apesar de evidências de aumento da aridez e redução do excedente hídrico. As províncias de Nampula e Cabo Delgado apresentam uma redução progressiva da precipitação e um aumento da demanda evaporativa, o que pode comprometer a disponibilidade hídrica a longo prazo. Entretanto, Niassa apresenta resiliência hídrica, com manutenção dos níveis de precipitação e até mesmo um ligeiro aumento no excedente hídrico. Estas diferenças podem ser explicadas por variações nos padrões atmosféricos, incluindo a Zona de Convergência Intertropical e a influência do Oceano Índico. A longo prazo, o Norte poderá enfrentar desafios crescentes na gestão dos recursos hídricos, exigindo estratégias para conservação da umidade do solo, o fortalecimento da infraestrutura hídrica e adaptação da agricultura a um ambiente potencialmente mais seco.

2.3.3 Análise Comparativa Decenal do Balanço Hídrico em Moçambique

A análise decenal do balanço hídrico em Moçambique revela contrastes entre as regiões sul, centro e norte no período de 1993 a 2023, tanto em termos de precipitação quanto de déficit e excedente hídrico. A região sul, abrangendo Maputo, Gaza, e Inhambane, evidencia uma intensificação progressiva da aridez. A precipitação média decenal em Gaza caiu de 693,0 mm na primeira década para 637,2 mm na segunda, com recuperação tímida para 655,1 mm na terceira. Simultaneamente, a ETP aumentou de 1268,2 mm para 1358,2 mm, resultando em um crescimento expressivo da deficiência hídrica (DEF), que alcançou 703,1 mm na última década. O EXC tornou-se nulo em todas as províncias do sul nas duas últimas décadas, indicando o esgotamento da recarga de aquíferos e da água superficial, particularmente entre os meses de abril a outubro. Esse padrão é coerente com o aumento da temperatura regional e mudanças nos padrões de circulação atmosférica.

No centro do país, o BH mostrou resiliência, embora com sinais claros de pressão hidrológica. A precipitação em Sofala caiu de 1390,2 mm (1994-2003) para 1247,5 mm (2004-2013), com leve recuperação para 1315,1 mm na década mais recente. Apesar disso, o EXC, embora presente, sofreu declínio de 482,6 mm para 262,9 mm, subindo novamente para 358,2 mm. Em Zambézia, a precipitação caiu 14,4% entre a primeira e segunda década, e DEF subiu de 305 mm para 377,5 mm. Embora a região mantenha alguma recarga hídrica durante a estação chuvosa (janeiro a março), observa-se uma tendência de alongamento da estação seca e diminuição da disponibilidade hídrica anual.

A região norte apresenta o padrão mais estável entre as três. Em Niassa, a precipitação aumentou de 1192,8 mm para 1229,3 mm nas três décadas, enquanto o EXC subiu de 536,2 mm para 568,9 mm. Já em Nampula, a precipitação diminuiu 10,4% (1203,0 mm para 1078,3 mm), com DEF crescente (429,3 mm para 441,2 mm) e EXC em queda (470,2 mm para 350,7 mm). Cabo Delgado permaneceu relativamente estável, mas também com tendência de elevação da ETP e declínio do EXC. As condições mais amenas no norte podem ser atribuídas à influência da zona de convergência intertropical (ZCIT) e ao regime de monções tropicais, favorecendo chuvas mais consistentes e menor variabilidade interdecadal.

Os resultados demonstram uma intensificação de aridez no sul, uma condição intermediária no centro com declínio da resiliência hídrica em Zambézia e Sofala, e uma maior estabilidade no Norte, com Niassa mostrando melhores indicadores de sustentabilidade hidrológica. Estes achados estão em consonância com estudos prévios sobre impactos do aquecimento global e variabilidade climática no sudeste africano (Rodell *et al.*, 2018; Nelson *et al.*, 2021; Chongue; Nishii, 2024) e reforçam a urgência de políticas adaptativas para mitigação dos efeitos climáticos na agricultura e nos recursos hídricos.

2.4 CONCLUSÕES

A análise do balanço hídrico climatológico em Moçambique (1994-2023) mostra um padrão sazonal bem definido, com a precipitação concentrada entre novembro e março, enquanto a evapotranspiração potencial (ETP) se mantém elevada ao longo de todo ano. A precipitação média mensal não foi suficiente para superar a ETP na maior parte do ano, resultando em déficits hídricos persistentes, especialmente entre abril e outubro, com intensidade variável entre as regiões.

Em comparação, o armazenamento de água no solo foi mais favorável na região Centro, particularmente em Sofala e Zambézia, onde o EXC atingiu valores elevados no período chuvoso, indicando uma recarga hídrica mais significativa. No Sul, DEF foi mais severa, especialmente em Gaza, com déficits mensais superiores a 45 mm na estação seca, refletindo uma menor capacidade de retenção de umidade do solo. No Norte, apesar das chuvas expressivas em Nampula e Niassa, longos períodos de DEF ocorrem na estação seca, evidenciando a forte dependência da precipitação para a disponibilidade hídrica.

A distribuição da DEF e do EXC por estação do ano reforça a vulnerabilidade hídrica de Moçambique. O EXC ocorre principalmente no verão, mas não compensa os DEF prolongados do inverno e da primavera, levando a períodos de estresse hídrico que afetam a resiliência agrícola e ecológica. As províncias do Sul e do Norte apresentam déficits mais acentuados nos meses secos, enquanto a região Centro mantém um balanço hídrico mais equilibrado devido aos maiores volumes de precipitação.

Em Moçambique como um todo, a análise decenal demonstra uma tendência crescente de déficit hídrica, especialmente no Sul e centro, enquanto o Norte permanece relativamente estável. A redução da precipitação na segunda década, seguida por uma recuperação parcial na última, não compensou o aumento da ETP, intensificando a DEF e reduzindo o EXC.

Os resultados evidenciam a necessidade de estratégias de gestão de recursos hídricos mais eficientes para mitigar os impactos da variabilidade climática, incluindo a captação e armazenamento de água durante a estação chuvosa, o uso de culturas resistentes à seca e a implementação de práticas agrícolas sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABBAS, M.; RIBEIRO, P. F.; SANTOS, J. L. Farming system change under different climate scenarios and its impact on food security: an analytical framework to inform adaptation policy in developing countries. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [s. l.], v. 28, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11027-023-10082-5>.

ADISA, O. M.; BOTAI, C. M.; BOTAI, J. O.; BOTAI, J. O.; HASSEN, A.; DARKEY, D.; TESFAMARIAM, E. H.; ADISA, A. F.; ADEOLA, A. M.; NCONGWANE, K. P. Analysis of agro-climatic parameters and their influence on maize production in South Africa. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 134, n. 3, p. 991–1004, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2327-y>
<https://doi.org/10.1007/S00704-017-2327-Y>

AEBISCHER, T. Center of a Territory: Definitions and Methods. The Case of Italy. [s. l.], 2014. Disponível em: <http://www.ijmse.org/Volume5/Issue12/paper1.pdf>.

Agriculture and Food Security: Implications on Sustainable Development and the WEF Nexus (pp. 155–163). (2022). Springer eBooks.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-96538-9_10

ALEMAW, B. F.; CHAOKA, T. R. A continental scale water balance model: a GIS-approach for Southern Africa. **Physics and Chemistry of the Earth** 28 957–966. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.040>

AL-FALAH, A. H. et al. Hydrological investigation of climate change impact on water balance components in the agricultural terraced watersheds of Yemeni highland. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04913-x>

AL-SUDANI, H. I. Z. Derivation Mathematical Equations for Future Calculation of Potential Evapotranspiration in Iraq, A Review of Application of Thornthwaite Evapotranspiration. **Iraqi journal of science**, [s. l.], v. 60, n. 5, p. 1037–1048, 2019. Disponível em: <https://ijs.uobaghdad.edu.iq/index.php/eijs/article/view/758>.
<https://doi.org/10.24996/IJS.2019.60.5.13>

APOSTOL, T. M.; MNATSAKANIAN, M. A. Centroids. In: **New Horizons in Geometry**. Washington, D.C.: Mathematical Association of America (2012). DOI: <https://doi.org/10.5948/UPO9781614442004>

BÁRBARO, I.M; BRANCALIÃO, S.R.; TICELLI, M. É possível a fixação biológica de nitrogênio no milho? 2008. Artigo em Hypertexto.
https://www.infobibos.com.br/artigos/2008_2/fixacao/index.htm

BEEKMAN, W.; VELDWISCH, G. J. Supporting farmer-led irrigation in Mozambique. **Sustainability**, [s. l.], v. 8, n. 6, 2016. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/386731>

BENTO, C.; CARDOSO, P.; BEILFUSS, R. D.; CHIMIMBA, C. T. Zoogeographic regionalisation of terrestrial vertebrates of Mozambique. **African Journal of Ecology**, [s. l.], v. 62, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1111/aje.13248>

CANGELA, G. L. C.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; MORAIS, J. E. F.; SILVA, J. R. I.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, E. F. F.; LAMPIÃO, J. L. Análise Temporal da Chuva e Balanço Hídrico Climatológico para o Município de Chimoio, Moçambique. **Revista Brasileira de Geografia Física, [S.l.]**, 2023.

<https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p%25p>

CHICHANGO, F.; CRISTOVAO, L.; GRANDE, S. Solar dryer technologies for agricultural products in Mozambique: An overview. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. e6812439850, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.39850>.

CHONGUE, L. A.; NISHII, K. The influence of tropical and subtropical modes of climate variability on precipitation in Mozambique. **International Journal of Climatology**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.1002/joc.8509>

DA SILVA, I. W. H. et al. Meteorological and biophysical controls of evapotranspiration in tropical grazed pasture under rainfed conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108884>

FERRIER, H.; RUPPEL, O. C. Country report for Mozambique. In: Ruppel, O. C.; Ginzky, H.; Murray, R. (Orgs.). **Legal Pathways to Sustainable Soil Management in Africa**. Baden-Baden: Nomos, 2025. p. 393-466. Disponível em: <https://doi.org/10.5771/9783748951230-393>.

FILHO, J. A.; ROSA, G. B.; VIEIRA, J. H. C.; FUZZO, D. F. da S. Thornthwaite Moisture Index for the Triângulo Mineiro, Brazilian Cerrado Region, Under Climate Change. **Revista Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 37, n. 1, 2025. <https://doi.org/10.14393/sn-v37-2025-73957>

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M. de; MATOS, R. M. de; SANTOS, D.; SABOYA, L. M. F. Evapotranspiração de referência mensal e anual pelo método de Thornthwaite para o estado da Paraíba. [s. l.], v. 20, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/download/41569/32597>
<https://doi.org/10.5380/ABCLIMA.V20I0.41569>

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, 2, 150066, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GANNON, J. P.; MCGUIRE, K. J. An Interactive Web Application Helps Students Explore Water Balance Concepts. **Frontiers in Education**, [s. l.], v. 7, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.873196>

GONÇALVES, M. M.; PENNER, G. C.; MARTINS, R. T. A. A. Adaptação da metodologia de Thornthwaite E Mather para balanço hídrico em uma microbacia hidrográfica. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 8, 2020. <https://doi.org/10.33448/RSD-V9I8.6060>

- HAWKESFORD, M. J. Enhancing food security amid climate change through rewilding and de novo domestication. **Frontiers in Science**, [S.l.], v. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1531043>.
- HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, p. 1999–2049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- HOGUANE, A. Perfil diagnóstico da zona costeira de Moçambique. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 69–82, 2007. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/rgci11.html>. DOI: 10.5894/rgci11.
- HUSSEIN, M. F.; AZAD, U. Water balance calculation and climate type for proposed dam in Bastora Basin Erbil, North Iraq. **Iraqi Geological Journal**, [S.l.], v. 56, n. 2D, p. 258–277, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.46717/igj.56.2D.20ms-2023-10-26>.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE). **Anuário Estatístico 2019 Moçambique**. Maputo: Instituto Nacional de Estatística, 2020.
- JALANE, O. I.; DA SILVA, E. V.; SOPCHAKI, C. H. Agricultura de subsistência e mudanças climáticas: casos dos distritos de Magude e Moamba (sul de Moçambique). [S.l.], p. 123–130, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021V7N2ID21231>.
- KIPKEMOI, I. et al. Climatic expression of rainfall on soil moisture dynamics in drylands. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, [S.l.], p. 1–24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-2021-48>.
- LI, M. et al. Climate-smart irrigation strategy can mitigate agricultural water consumption while ensuring food security under a changing climate. **Agricultural Water Management**, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108663>.
- LIMA, R. F. de et al. Thornthwaite's (1948) climate classification in the Central-West Region: an innovative approach to Brazil's largest grain-producing region. **Revista Contemporânea**, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.56083/rcv3n10-062>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- LOBOGUERRERO, A. M. et al. Feeding the world in a changing climate: an adaptation roadmap for agriculture. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193356920>.
- LOUZADA, F. L. R. de O.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Climatological water balance with data estimated by Tropical Rainfall Measuring Mission for the Doce River Basin. **Engenharia Agrícola**, [S.l.], v. 38, n. 3, p. 376–386, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n3p376-386/2018>.
- MAMMOLITI, E.; FRONZI, D.; MANCINI, A.; VALIGI, D.; TAZIOLI, A. WaterbalANce, a WebApp for Thornthwaite–Mather Water Balance Computation: Comparison of

Applications in Two European Watersheds. **Hydrology**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 34, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/8/1/34>
<https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY8010034>

MANHIQUE, A. J. The South Indian Convergence Zone and relationship with rainfall variability in Mozambique. [s. l.], 2008. Disponível em: <https://open.uct.ac.za/handle/11427/6492>.

MANHIQUE, A. J.; REASON, C. J. C.; BARIMALALA, R. Rainfall onset and cessation over Mozambique and relationship with sea surface temperature and atmospheric patterns. **International Journal of Climatology**, v. 43, n. 11, p. 4849–4863, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.8120>.

MARIOTE, D. Response to selection for downy mildew (*Peronosclerospora sorghi*) and maize streak virus resistance in three quality protein maize populations in Mozambique. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Genética Vegetal) – School of Agricultural Sciences and Agribusiness, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 2007. Disponível em: <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/1232>.

MAURE, G. A.; BILA, S.; HACHIGONTA, S.; SIBANDA, L. M.; THOMAS, T. S. Southern African Agriculture and Climate Change: a comprehensive analysis — Mozambique. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, dez. 2012. Disponível em: <https://www.africaportal.org/publications/southern-african-agriculture-and-climate-change-a-comprehensive-analysis-mozambique/>.

MAVODYO, E. The Impact of Climate Change on Food Insecurity in The Southern African Development Community. **JDE (Journal of Developing Economies)**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 162–183, 2023. Disponível em: <https://e-journal.unair.ac.id/JDE/article/download/43534/25074>.
<https://doi.org/10.20473/jde.v8i1.43534>

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**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 588, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/5/588/htm>.
<https://doi.org/10.3390/ATMOS12050588>

MITSUISHI, T. Definition of Centroid Method as Defuzzification. **Formalized Mathematics**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 125–134, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/forma-2022-0010>.

MITTAL, A. et al. QGIS: an effective tool in assessing the quantity and quality of groundwater resources. **Water Science & Technology: Water Supply**, [s. l.], 2025. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2025.004>

MACAMO, A. D. **Potential productivity of maize in Mozambique: modelling of current and future scenarios**. 2022. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/28628>.

- MUNDAY, C.; WASHINGTON, R. Circulation controls on southern African precipitation in coupled models: The role of the Angola Low. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 122, n. 2, p. 861–877, 2017. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JD025736>.
<https://doi.org/10.1002/2016JD025736>
- NASH, D. J. Changes in Precipitation Over Southern Africa During Recent Centuries. [S. l.]: Oxford University Press, 2017. 2017. Disponível em: <https://cris.brighton.ac.uk/ws/files/464788/Nash%20Precipitation%20over%20southern%20Africa%2016-R1%20post-print.pdf>.
<https://doi.org/10.1093/ACREFORE/9780190228620.013.539>
- NCOYINI-MANCIYA, Z.; SAVAGE, M. J.; STRYDOM, S.; CLULOW, A. D. Long-term reference evapotranspiration trend and causative factors analysis in the sugarbelt area of the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. **The South African Journal of Plant and Soil**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 204–212, 2022.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2022.2069874>
- NELSON, G. C.; ROSEGRANT, M. W.; PALAZZO, A. The role of climate-smart agriculture in ensuring food security under climate change. **Global Food Security**, v. 29, p. 100522, 2021. DOI: 10.1016/j.gfs.2021.100522.
- NIYONSENGA, S.; GUTHIGA, P.; DIA, K.; NDOYE, A. Impacts of El Niño-Induced Drought in Mozambique. El Niño 2024 in Southern Africa Series, No. 04. Kigali: AKADEMIYA2063, 2024. <https://doi.org/10.54067/elninoeffectinsas.04>
- ORINA, P. S. et al. A Review on Africa's Agricultural Farming Systems and Potential for Transition. [s. l.], p. 01–08, 2024. <https://doi.org/10.70107/collectjagricsci-ART0032>
- QUERINO, C. A. S. et al., Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas. **Revista do Departamento de Geografia**, [s. l.], v. 43, p. e191137, 2023. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/download/191137/193887>
<https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2023.191137>
- REDDY, K. S. et al. Water Footprint Assessment of Rainfed Crops with Critical Irrigation under Different Climate Change Scenarios in SAT Regions. *Water*, [s. l.], 2022. <https://doi.org/10.3390/w14081206>
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. The Water Balance in Agricultural and Natural Systems. Em: [S. l.]: Springer, Cham, 2020. p. 289–312. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-19322-5_15 .
https://doi.org/10.1007/978-3-030-19322-5_15
- RESENDE, M; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. A cultura do milho irrigado. Brasília: Embrapa, 2003.

RODELL, M.; FAMIGLIETTI, J. S.; WIESE, D. N.; et al. Emerging trends in global freshwater availability. **Nature**, [s. l.], v. 557, p. 651–659, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>.

RODRIGUES, A. D. N. Thornthwaite's Method for the Computation of the Water Balance. **Environmental earth sciences**, [s. l.], p. 339–347, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04375-8_38

SCHULMAN, S. Mozambique's Climate Crisis. *RUSI Journal*, [s. l.], v. 168, n. 4, p. 10–29, 2023. <https://doi.org/10.1080/03071847.2023.2247748>

SEGURA, H., JUNQUAS, C., ESPINOZA, J.C. ET AL. New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. **Climate Dynamics** **53**, 405–426 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4590-8>

SILVA, J. V.; BAUDRON, F.; NGOMA, H.; NYAGUMBO, I.; SIMUTOWE, E.; KALALA, K.; HABEENZU, M.; MPHATSO, M.; THIERFELDER, C. Narrowing maize yield gaps across smallholder farming systems in Zambia: what interventions, where, and for whom?. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 43, n. 2, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13593-023-00872-1.pdf>. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00872-1>

TODOTE, V. A. L.; LYRA, G. B.; ABREU, M. C. Climatological water balance and climate classification of Thornthwaite and Mather for Benin, west Africa, in 1970-2015 period. [s. l.], v. 29, p. 291–302, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/12387>. <https://doi.org/10.13083/REVENG.V29I1.12387>

TOROMADE, A. S.; SOYOMBO, D. A.; KUPA, E.; IJOMAH, T. I. Reviewing the impact of climate change on global food security: Challenges and solutions. **International journal of applied research in social sciences**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. 1403–1416, 2024. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i7.1300>

TRAN, H. Q.; FEHÉR, Z. Water balance calculation capability of hydrological models. **Acta Agraria Kaposváriensis**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 37–53, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31914/aak.2877>

UKUDO, A. B.; BOLARINWA, F. O.; ARE-KILANSE, L. O. The Impact of Climate Change on Food Security in Selected African Countries. [s. l.], v. 01, n. 05, 2024. <https://doi.org/10.55677/gjefr/06-2024-vol01e5>

VALLE, L. C. G. do J.; VOURLITIS, G. L.; CURADO, L. F. A.; PALÁCIOS, R. da S.; NOGUEIRA, J. de S.; LOBO, F. de A.; ISLAM, A. R. Md. T.; RODRIGUES, T. R. Evaluation of FAO-56 Procedures for Estimating Reference Evapotranspiration Using Missing Climatic Data for a Brazilian Tropical Savanna. **Water**, [s. l.], v. 13, n. 13, p. 1763, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/13/1763/pdf>. <https://doi.org/10.3390/W13131763>

VENÂNCIO, L.; CUNHA, F. F. da; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; EUGÊNIO, F. C.; ALEMAN, C. C. Penman-Monteith with missing data and

Hargreaves-Samani for ETo estimation in Espírito Santo state, Brazil. [s. l.], 2019. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7835159>

WANNIARACHCHI, S.; SARUKKALIGE, R. A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future. **Hydrology**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 123, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/9/7/123/pdf?version=1657274755> <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>

WESTERMANN, K. Partitioning of Precipitation Into Terrestrial Water Balance Components Under a Drying Climate. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 59, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022WR033538>

YU-SONG, W.; BAI, H.; YANG, X.; WEN, Z.; ZHANG, Y.; LI, B. Detecting Spatiotemporal Shifts in Precipitation Core Regions Using a Centroid-Based Identification Method and Its Application in China. [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4924856/v1>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa sobre a variabilidade temporal e espacial da temperatura do ar e do balanço hídrico climatológico em Moçambique, ao longo de três décadas (1994–2023), permitiu identificar tendências climáticas significativas que impactam diretamente a segurança hídrica e a sustentabilidade agrícola do país. Ao articular os resultados dos dois capítulos, um centrado na evolução da precipitação e temperatura, e outro na dinâmica do balanço hídrico, foi possível construir um diagnóstico climático robusto, com implicações diretas para a formulação de políticas públicas, gestão de recursos naturais e adaptação às mudanças climáticas.

A análise revelou uma redução média de 55 mm na precipitação anual acumulada e um aumento médio de 0,6 °C na temperatura, com padrões espaciais distintos entre as regiões. O Sul do país, particularmente a província de Gaza, demonstrou ser a mais vulnerável à seca, evidenciada tanto pelas quedas acentuadas na precipitação quanto pelos aumentos térmicos mais expressivos. A Região Centro, com destaque para Sofala e Zambézia, mostrou maior resiliência hídrica, evidenciada por excedentes hídricos significativos durante o período chuvoso. Já o Norte, embora tenha registrado volumes pluviométricos elevados, também apresentou deficiências hídricas marcantes na estação seca, refletindo forte sazonalidade e elevada dependência da chuva.

O balanço hídrico climatológico, estimado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), confirmou que a evapotranspiração potencial supera, em média, os volumes de precipitação, resultando em um déficit hídrico persistente ao longo do ano, sobretudo entre abril e outubro. Esta condição é agravada pela elevação da temperatura média, que intensifica a perda de água por evaporação e transpiração, elevando a pressão sobre os recursos hídricos disponíveis e comprometendo a produtividade agrícola, especialmente das culturas de sequeiro.

A tendência crescente da deficiência hídrica ao longo das décadas, mesmo em um contexto de leve recuperação pluviométrica na década final do período analisado, evidencia que os efeitos do aquecimento regional superam os ganhos eventuais em precipitação. Os resultados indicam que a variabilidade climática em Moçambique não apenas é uma realidade mensurável, mas também uma ameaça concreta à estabilidade dos sistemas agrícolas, ecológicos e socioeconômicos do país.

Neste contexto, torna-se imperativo o desenvolvimento e a implementação de estratégias de adaptação climática baseadas em evidências científicas, como o uso de cultivares tolerantes ao estresse hídrico, sistemas de irrigação mais eficientes, conservação do solo e captação de águas pluviais. Além disso, a integração de dados climáticos geoespaciais de alta resolução em sistemas de alerta precoce e planejamento agrícola deve ser ampliada, a fim de fortalecer a resiliência local frente à intensificação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- BEEKMAN, W.; VELDWISCH, G. J. Supporting farmer-led irrigation in Mozambique. **Sustainability**, [s. l.], v. 8, n. 6, 2016. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/386731>
- BENTO, C.; CARDOSO, P.; BEILFUSS, R. D.; CHIMIMBA, C. T. Zoogeographic regionalisation of terrestrial vertebrates of Mozambique. **African Journal of Ecology**, [s. l.], v. 62, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1111/aje.13248>
- CHICHANGO, F.; CRISTOVAO, L.; GRANDE, S. Solar dryer technologies for agricultural products in Mozambique: An overview. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. e6812439850, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.39850>.
- DOS MUCHANGOS, A. Moçambique: paisagens e regiões naturais. Maputo, 1999.
- FERRIER, H.; RUPPEL, O. C. Country report for Mozambique. In: Ruppel, O. C.; Ginzky, H.; Murray, R. (Orgs.). **Legal Pathways to Sustainable Soil Management in Africa**. Baden-Baden: Nomos, 2025. p. 393-466. Disponível em: <https://doi.org/10.5771/9783748951230-393>.
- FLANAGAN, P. X. Precipitation and temperature maxima: A study across the Southern Great Plains winter wheat region. **Earth Interactions**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.1175/ei-d-23-0019.1>
- HOGUANE, A. Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. [s. l.], v. 7, n. 1, p. 69–82, 2007. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/rgci11.html> DOI: 10.5894/rgci11
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE). **Anuário Estatístico 2019 Moçambique**. Instituto Nacional de Estatística, Maputo, 2020.
- JAYA, I. G. N. M. et al. A relationship between temperature and precipitation over the contiguous Bandung city, Indonesia. **Communications in Mathematical Biology and Neuroscience**, [S.l.], n. 2020:63, 2020.
- MANHIQUE, A.; REASON, C.; BARIMALALA, R. Rainfall onset and cessation over Mozambique and relationship with sea surface temperature and atmospheric patterns. **International Journal of Climatology**, [s. l.], 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.8120>
- TIWARI, S.; KASHYAP, P. S.; TAMANG, S. K.; IMMANUEL, J. Climate Trends and Future Projections: Analyzing Temperature and Precipitation Patterns in the Guwahati Region. [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4070094/v1>