



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ZONEAMENTO MULTI-MODELO DOS RISCOS
CLIMÁTICOS EM CULTURAS ANUAIS EM MOÇAMBIQUE**

Artur Pedro Madal

Maputo

2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ZONEAMENTO MULTI-MODELO DOS RISCOS
CLIMÁTICOS EM CULTURAS ANUAIS EM MOÇAMBIQUE**

Artur Pedro Madal

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável.

Supervisor: Doutor Adelino José Chingore Juga, PhD

Co-Supervisor: Doutor François Affholder, PhD

Maputo

2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ZONEAMENTO MULTI-MODELO DOS RISCOS CLIMÁTICOS EM CULTURAS ANUAIS EM MOÇAMBIQUE

Artur Pedro Madal

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável.

Aprovado em 2 de Dezembro de 2024, por:

Prof. Doutor Sebastião Inácio Famba
(Arguente - FAEF - UEM)

Prof. Doutor Ernesto Lenathy Muheca
(Presidente - DMI - UEM)

Doutor Adelino José Chingore Juga, PhD
(Supervisor – DMI - UEM)

Doutor François Affholder, PhD
(Co-Supervisor - CIRAD)

Maputo

Dezembro/2024

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, a minha esposa, a minha filha Zayla e aos meus irmãos.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro que este trabalho é da minha autoria e resulta da minha investigação, estando indicadas no texto e na referência bibliográfica as fontes utilizadas. Esta é a primeira vez que o submeto para obter um grau académico numa instituição de ensino superior.

Maputo, aos _____ de _____ de 2024

(Artur Pedro Madal)

AGRADECIMENTOS

A DEUS Todo-Poderoso, pelo dom da vida, saúde e conhecimento.

Aos meus pais Pedro Madal e Elvira Armando Munguambe (em memória), pela educação, amor e apoio moral durante a minha jornada.

A minha esposa Julieta Ananias Muchanga pelo apoio incondicional.

Agradeço aos meus supervisores Doutor François Affholder (PhD) e Doutor Adelino José Chingore Juga (PhD), pelo contínuo acompanhamento, orientação e disponibilização de materiais e meios para realização deste trabalho.

A UEM-FAEF-CIRAD pela oportunidade de estágio.

Ao Prof. Doutor Sebastião Famba pelos conselhos e revisão do trabalho.

Aos docentes do DMI que directa e indirectamente contribuíram na minha formação.

Aos meus colegas do curso de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica para o Desenvolvimento Sustentável Silva Rassul, Filoca Fondo, Joaquim Valoi, Januário Inguana, Horácio Januário, Alberto Come, Deiby Gomes, Álvaro Panguana, Augusto Cumba, José Daniel Facuze, Alexandre Tavete, Edelson Assado, Yussufo Anselmo, Amália Mahumane, Eufreginia Manjaze, Rabeca Manuel, Paulo Martinho, Domingos Mendonso, Adérito Piloto e Tomazina Sithoe.

RESUMO

Os recursos terrestres são limitados e o número de população que necessita de alimento na terra está a crescer rapidamente, colocando a agricultura em risco. As flutuações na precipitação, secas, inundações frequentes e tempestades são tidos como os principais riscos relacionados com o clima para o sector agrícola, onde aproximadamente 80% da população moçambicana está empregada. Os agricultores em Moçambique não têm conhecimento sobre práticas de redução de riscos climáticos associadas aos sistemas de produção agrícola não melhorados. Por outro lado, o desenvolvimento tecnológico tem estabelecido modelos de cultivo que simulam vários fenómenos da natureza e que possam ser usados para o auxílio na planificação de sistemas agrícolas. Entretanto, as comparações entre modelos de cultivo são úteis para contrastar a consistência entre modelos e quantificar a incerteza das previsões. Portanto, o presente estudo visa avaliar a sensibilidade do risco climático na cultura de milho em Moçambique usando ACME. Para tal, foram descarregados dados de clima global no CHIRPS e ERA5 para os 15 locais seleccionados para um período de 2003 a 2022, escolhidas 26 datas de sementeira, um tipo de solo, duas variedades de milho, 3 combinações de simulação e compôs-se um experimento virtual que resultou em $26 \times 1 \times 2 \times 19 \times 15 \times 3 = 44.460$ unidades de simulação para cada um dos três modelos, DSSAT, STICS e CELSIUS. O experimento virtual revelou que o rendimento simulado do milho varia conforme a localização e, que existe variação substancial entre os modelos na estimativa do rendimento do milho, sugerindo a necessidade da sua calibração para as condições de Moçambique. A simulação de Y_w e Y_w/Y_0 mostra que esses parâmetros podem ser usados na tomada de algumas decisões, enquanto o risco entre agricultores varia, sendo influenciado pela variabilidade interanual do clima. Além disso, a estimativa do intervalo de sementeira difere entre os modelos, reforçando a necessidade da sua calibração.

Palavras-chaves: ACME, Experimento virtual, Janela de sementeira, Milho.

ABSTRACT

Land resources are limited and the number of people needing food from the land is growing rapidly, putting agriculture at risk. Fluctuations in precipitation, droughts, frequent floods and storms are considered the main climate-related risks for the agricultural sector, where approximately 80% of the Mozambican population is employed. Farmers in Mozambique are not aware of climate risk reduction practices associated with unimproved agricultural production systems. On the other hand, technological development has established crop models that simulate natural phenomena and that can be used to aid in the planning of agricultural systems. However, comparisons between crop models are useful for contrasting the consistency between models and quantifying the uncertainty of predictions. Therefore, the present study aims to assess the climate risk sensitivity of maize crops in Mozambique using ACME. To this end, global climate data were downloaded from CHIRPS and ERA5 for the 15 selected sites for a period from 2003 to 2022, 26 sowing dates, one soil type, two maize varieties, 3 simulation combinations were chosen and a virtual experiment was composed that resulted in $26 \times 1 \times 2 \times 19 \times 15 \times 3 = 44,460$ simulation units for each of the three models, DSSAT, STICS and CELSIUS. The virtual experiment revealed that the simulated maize yield varies according to location and that there is substantial variation between the models in estimating maize yields, suggesting the need for them to be calibrated to Mozambique's conditions. The simulation of Y_w and Y_w/Y_0 shows that these parameters can be used to make some decisions, while the risk between farmers varies, being influenced by the inter-annual variability of the climate. In addition, the estimate of the sowing interval differs between the models, reinforcing the need for their calibration.

Keywords: ACME, Virtual experiment, Sowing window, Maize.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gestão de entrada e saída ACME – DataMill.....	11
Figura 2: Diferentes níveis de produção e os factores de contribuição.....	12
Figura 3: Mapa de Moçambique com os seus limites provinciais, e os 15 pontos geográficos.....	13
Figura 4: Composição de dados NetCDF.....	22
Figura 5: Diagrama resumindo o processo de extracção dos dados.....	23
Figura 6: Diagrama de Tukey para a precipitação média mensal em Moçambique. Cada diagrama elementar, resulta da média mensal de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.	27
Figura 7: Mapa de distribuição espacial e temporal da precipitação mensal por pixel em Moçambique, observada (CHIRPS) entre 2003 a 2022.	29
Figura 8: Variabilidade da precipitação em Moçambique entre 2003 a 2022. Cada valor da precipitação média anual, resulta da média de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.	29
Figura 9: Índice padronizado de anomalia mensais da precipitação por pixel em Moçambique para o período 2003 a 2022.	30
Figura 10: Diagrama de Tukey para a temperatura média mensal em Moçambique. Cada diagrama elementar, resulta da média mensal de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.	31
Figura 11: Mapa de distribuição espacial e temporal da temperatura mensal por pixel em Moçambique, observada (ERA 5) entre 2003 e 2022.....	32
Figura 12: Variabilidade da temperatura em Moçambique entre 2003 a 2022. Cada valor da temperatura média anual, resulta da média de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.	32
Figura 13: Variação do rendimento potencial da biomassa e do grão do milho em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 5 diferentes pontos dando respostas contrastantes em Moçambique.....	33
Figura 14: Variação do rendimento potencial da biomassa e do grão do milho limitado pela água em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 5 diferentes pontos dando respostas concordantes em Moçambique.	35

Figura 15: Variação do rendimento potencial do grão e biomassa limitado pela água e nitrogénio em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 5 diferentes pontos dando respostas contrastantes em Moçambique.	37
Figura 16: Variação do rendimento médio da biomassa e grão de milho em função da data de sementeira para diferentes cenários de simulação (Y_0 , Y_w e Y_{wn}) de 5 diferentes pontos dando respostas concordantes em Moçambique.	38
Figura 17: Variação do rendimento relativo do grão do milho limitado pela água (Y_w/Y_0) e limitado pela água e nitrogénio (Y_{wn}/Y_0) em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.	40
Figura 18: Intervalos de datas de sementeira com a probabilidade igual ou maior que 70% do máximo do Y_{wrel} e Y_{wnrel} , em função dos modelos, cenários de simulação (Y_w e Y_{wn}), variedades em estudo de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.	41
Figura 19: Intervalo de sementeira em função da variedade, modelos usados e cenário de simulação para uma média de 15 pontos seleccionados em Moçambique.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos principais tipos de Zoneamento.....	6
Tabela 2: Variáveis usadas no estudo.....	21
Tabela 3: Classificação da intensidade do índice de anomalia da chuva.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS

.grib	<i>General Regularly-distributed Information in Binary Form</i>
.zarr	<i>Zarrita</i>
ACME	<i>Agile Crop Model Ensemble</i>
APSIM	<i>Agricultural Production Systems Simulator</i>
CFSv2	<i>Coupled Forecast System da NOAA version 2</i>
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data</i>
CHPClim	<i>The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology</i>
CIRAD	<i>Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPC	Centro de Previsão Climática
ENSO	El Nino Oscilação Sul
ERA5	<i>5th Generation of European ReAnalysis</i>
Esri BIL	<i>Band Interleaved by Line</i>
FAEF	Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal
FAO	Organização para a Alimentação e Agricultura
GeoTiff	<i>Geographic Tagged Image File Format</i>
GIS	Sistemas de Informação Geográfica
IAC	Índice de Anomalia das Chuvas
ID	Identificação
IOD	Dípolo do Oceano Indico
ITCZ	Zona de Convergência Intertropical
km	Quilómetros
MDE	Modelo Digital de Elevação
MJO	Oscilação Madden-Julian
NCDC	<i>National Climatic Data Center</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
SIOD	Dípolo da Região Subtropical do Oceano Indico
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
UCSB	<i>Climate Hazards Group at the University of California, Santa Barbara</i>
UCSB	<i>University of California, Santa Barbara</i>
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
Y0	Rendimento Potencial
Ymed	Rendimento Potencial Médio
Yn	Rendimento Potencial Limitado pelos Nutrientes
Yw	Rendimento Potencial Limitado pela Água
Ywn	Rendimento Potencial Limitado por Água e Nutrientes
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático

SUMÁRIO

<i>Dedicatória</i>	i
DECLARAÇÃO DE HONRA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problema de Estudo e Justificação	2
1.3 Objectivos	3
1.3.1 Objectivo Geral	3
1.3.2 Objectivos Específicos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Zoneamento e sua importância no uso agrícola	4
2.1.1 Tipos de Zoneamento	4
2.2 Modelo de Cultivo	6
2.2.1 Classificação dos Modelos	8
2.4 Cadeia de Calculo ACME	9
2.4.1 Componentes do ACME	10
2.5 Definição de Rendimento da Cultura	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Descrição da Área de Estudo	13
3.1.1 Classificação do Clima em Moçambique	14
3.1.2 Factores que Influenciam o Clima em Moçambique	15
3.2 Aquisição de dados	20
3.2.1 Formato dos dados	21
3.2.2 Extracção dos Dados Adquiridos	22
3.3 Variações espaço-temporais do clima em Moçambique no período de 2003 a 2022	23
3.4 Modelo Físico de Gestão de Base de Dados	24
3.5 Experimento Virtual	25
3.6 Identificação da janela óptima de sementeira	26

4. RESULTADOS.....	27
4.1 Distribuição espaço-temporal da variabilidade do clima em Moçambique no período de 2003 a 2022.....	27
4.1.1 Distribuição espaço temporal da variabilidade da precipitação	27
4.1.2 Índice de anomalias mensais padronizadas da precipitação.....	30
4.1.3 Distribuição espaço temporal da variabilidade da temperatura	30
4.2 Variações simuladas do rendimento de grão e biomassa em função dos factores de experimento virtual	33
4.2.1 Rendimento potencial (Y0)	33
4.2.2 Rendimento limitado pela água (Yw)	34
4.2.3 Rendimento limitado pela água e nitrogénio (Ywn)	36
4.3 Rendimento relativo.....	39
4.4 Identificação do intervalo de sementeira com menor risco	40
5. DISCUSSÃO.....	43
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	45
6.1 Conclusões	45
6.2 Recomendações	45
7. REFERÊNCIAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

1.1 Antecedentes

Os recursos terrestres são finitos, enquanto o número de população que a terra deve sustentar continua a crescer rapidamente, o que cria um grande problema para a agricultura. A produtividade agrícola deve ser aumentada para atender às demandas crescentes, enquanto os recursos naturais devem ser protegidos. Para responder a esses desafios, são necessárias novas pesquisas agrícolas que forneçam informações aos agricultores e aos decisores políticos sobre como realizar uma agricultura sustentável apesar das grandes variações climáticas em todo o mundo (Rosenzweig et al., 2021; Radha & Murthy, 2015).

Moçambique possui extensas terras, ou seja, cerca de 36 milhões de hectares de terras aráveis, das quais apenas 10% estão em uso. O país dispõe ainda de muitos recursos hídricos e condições agro-ecológicas que proporcionam a prática da actividade agrícola (Marassiro et al., 2021). Entretanto, este sector, é considerado de grande importância para a economia do país e constitui a base do desenvolvimento. Além disso, é a fonte de emprego e renda para a maioria da população, onde cerca de 66% depende maioritariamente do sector agrário para alimentação e renda (MADER, 2023).

Os riscos climáticos estão relacionados às mudanças físicas das variáveis climáticas, como a temperatura e precipitação, das quais a agricultura depende. Estas variáveis, geralmente ditam o tipo de produção agrícola, a variedade e o calendário agrícola de um certo local. As mudanças nestas variáveis, podem alterar a produtividade agrícola de várias formas e as mudanças nas condições climáticas trarão novas dificuldades para várias culturas, regiões e sistemas agrícolas (Davis, 2011). Entretanto, os riscos climáticos são maiores quando o evento de estresse ocorre na fase fenológica mais sensível da cultura (Coelho et al., 2021).

Uma das formas de avaliar o risco climático na agricultura é por meio de uso de modelos de cultivo (Dias, 2016). Os modelos de cultivo têm o potencial de transcender a nossa compreensão de como as culturas interagem com a gestão agronómica no espaço e no tempo. Os modelos de cultivo têm sido aceites como ferramentas úteis que ajudam agrónomos, agricultores, decisores políticos e os investigadores a tomar decisões e recomendações mais informadas (Pasley et al., 2023). O objectivo de um modelo de cultivo é simular o crescimento da planta como o produto de uma série de interações entre a planta, o solo, o clima e o manejo da cultura (Hornberger & Spear, 1981).

Rosenzweig et al., (2021); Falconnier et al., (2020) nas suas pesquisas, demonstraram que o uso de conjuntos de modelos (multi-modelos) permite reduzir as incertezas associadas as simulações de produtividade quando cada um dos modelos é devidamente calibrado. Não obstante, estudos sobre modelos de cultivo em Moçambique foram conduzidos por Magaia (2017), Valeriano (2016) & Deixa (2014) em particular para a cultura de milho usando apenas o modelo Agricultural Production Systems Simulator (APSIM).

1.2 Problema de Estudo e Justificação

A variabilidade da precipitação e o aumento da frequência de eventos de seca e inundações, bem como tempestades são os principais riscos relacionados com o clima que afectam o sector agrícola que emprega cerca de 80% da população em Moçambique (Marassiro et al., 2021; Mabilana et al., 2012). Os efeitos manifestam-se na redução da produtividade agrícola e perda de colheitas devido ao estresse de seca e a curta época de cultivo.

Os agricultores moçambicanos de pequena escala que dependem da agricultura de sequeiro são os mais vulneráveis aos choques induzidos pelo clima. Isto pode se atribuir a falta de informação sobre as mudanças climáticas e seus impactos. Esses agricultores, não têm conhecimento sobre as práticas de redução de riscos climáticos, associadas ao sistema não melhorados de produção agrícola (Recha & Chiulele, 2017).

Por outro lado, com o desenvolvimento tecnológico foram estabelecidos modelos que simulam os fenómenos da natureza e que podem ser usados para o auxílio na planificação de sistemas agrícolas (Neto et al., 2005). Entretanto, ainda é um desafio adquirir dados suficientes para avaliar os modelos de simulação do crescimento da cultura de forma satisfatória.

Segundo Falconnier et al., (2020), as comparações entre os modelos de cultivo têm se mostrado úteis para contrastar a consistência entre os modelos e quantificar as incertezas das previsões. Eles ajudam a identificar fontes de incerteza relacionados aos parâmetros do modelo, a estrutura do modelo e aos usuários do modelo.

Todavia, estudos que visam o uso de múltiplos modelos na agricultura são raros em Moçambique. Entretanto, os modelos propostos no presente estudo já foram calibrados e aperfeiçoado de tal forma que os resultados sejam precisos.

1.3 Objectivos

1.3.1 Objectivo Geral

- Avaliar a sensibilidade do risco climático nas culturas anuais em Moçambique.

1.3.2 Objectivos Específicos

- Ilustrar as variações espaço-temporais do clima em Moçambique no período de 2003 a 2022;
- Comparar as variações simuladas do rendimento de grão e biomassa em função dos factores do experimento virtual;
- Identificar a janela óptima de sementeira em função dos factores do experimento virtual para os diferentes locais em Moçambique.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Zoneamento e sua importância no uso agrícola

Segundo Krufft (2001), o zoneamento é um sistema que regula o tipo e a intensidade do desenvolvimento do uso da terra que ocorre dentro de uma comunidade. Para Ometto (1981), zoneamento é a escolha dos locais mais indicados para as diversas culturas, a fim de obter-se uma maior rentabilidade do capital.

Monteiro (2020), considera zoneamento como um instrumento de ordenamento territorial, caracterizado pela aplicação de normas que visam regular o uso e a ocupação do território. Na perspectiva do autor, no caso da agricultura, o objectivo do zoneamento é de definir os usos de práticas agrícolas permitidas, recomendadas ou vedadas para um determinado local, tipo de solo ou época de cultivo.

2.1.1 Tipos de Zoneamento

Segundo Wollmann & Galvani (2013), existem quatro tipos de zoneamento com finalidade de uso para as actividades agrícolas: zoneamento agro-climático, zoneamento agrícola, zoneamento edafo-climático e zoneamento de risco climático.

O zoneamento agro-climático, preocupa-se em grande parte com o macroclima (Wollmann & Galvani, 2013), e de acordo com Greigh De Brito (2009) o zoneamento agro-climático determina a aptidão climática das regiões de um país. Além disso, em cada região define a aptidão de cada área para o cultivo de determinada espécie de interesse agrícola, tendo em conta as exigências agro-climáticas das culturas e as informações macroclimáticas.

O macroclima ou clima da região é determinado pela escala geográfica, como a latitude, longitude, altitude, continentalidade e massas de ar. Como o ser humano não pode alterar o macroclima de acordo com as necessidades das culturas esta informação deve ser considerada como a primeira ao planificar uma exploração agrícola (Pereira et al., 2002).

O zoneamento agrícola, por sua vez, leva em consideração, além dos elementos do clima, a associação de factores ou critérios como o solo (zoneamento edáfico), e o meio socioeconómico, com o objectivo de organizar a distribuição racional de culturas economicamente viáveis, respeitando as características sociais e culturais de cada região (Ometto, 1981).

Não obstante Ngolo (2014), afirma que o zoneamento agrícola pode ajuda a definir políticas públicas e programas agrícolas voltados ao desenvolvimento agrícola regional e nacional, a concessão de crédito rural, a industrialização agrícola, a conservação do solo e, especialmente a assistência técnica ao produtor. Todavia, Ngolo (2014); Sediya et al., (2001), sugerem a actualização frequente do zoneamento agrícola como forma de obtenção de informações sobre as condições climáticas das culturas seleccionadas e retorno do investimento a médio e longo prazo por parte dos agricultores, assim como servir de ferramenta de tomada de decisão no que tange aos factores que influenciam directa e indirectamente a produtividade agrícola.

O zoneamento edafo-climático, é considerado como um estudo complementar da potencialidade da cultura em um determinado local, no qual além do clima, inserem-se no estudo os aspectos edáficos ou pedológicos (Ometto, 1981), e é considerado na mesma escala de análise do zoneamento agro-climático (Wollmann & Galvani, 2013).

Para Oliveira et al., (2012), o zoneamento edafo-climático é uma ferramenta de planificação agrícola, que se baseia no levantamento dos factores que definem as aptidões agrícolas, principalmente com base nas propriedades do solo, topografia, declive e clima encontrado em diferentes áreas das regiões estudadas. Os autores referenciam ainda que quando se têm delimitadas as condições edafo-climático de uma região, pode-se definir regiões climaticamente homogêneas e assim determinar a cultura a ser implementada.

Por fim, o zoneamento de risco climático (ZARC), conforme Braga et al., (2023); Augusto et al., (2023); Mitidieri & Xavier De Medeiros (2008), é um instrumento de gestão de políticas agrícolas e de riscos na agricultura. Segundo Mitidieri & Xavier De Medeiros (2008), esse instrumento visa indicar datas de sementeira por local, correlacionando ao ciclo da cultura e ao tipo de solo, de modo a minimizar a chance de que adversidades climáticas coincidam com a fase mais sensível das culturas.

Não obstante, Luis et al., (2019) afirmam que ZARC é uma ferramenta de gestão risco que ajuda a reduzir o risco de perdas de culturas causadas pelas mudanças climáticas não controladas. Segundo os autores, o ZARC induz a utilização de tecnologias actualizadas no manejo de cultura bem como sua expansão em áreas e regiões ainda não contempladas.

Tabela 1: Características dos principais tipos de Zoneamento.

	Tipo de Zoneamento			
	Aptidão Agrícola	Agro-climático	Agrícola	Agrícola de Risco Climático
Análise de risco	- Potencial do: *clima * solo * fatores socioeconômicos (locais e regionais). - Potencial edafo-climático.	- Identifica áreas de maiores e menores riscos climáticos.	- Baseado no tipo de solo, clima local, e ciclo fenológico da planta.	- Considera o balanço hídrico, (relação clima, solo e planta). - O risco quantificado, através de análises probabilísticas e frequências.
Tipo de indicativo	- Área apta - Área marginal -Área inapta	- Define melhor época de plantio Identifica áreas com maior Potencial de produtividade	- Define melhor época de plantio - Indica cultivares habilitados para o local	- Por município, tipo de solo e ciclo da cultivar.
Problemas encontrados	- Mapas para as culturas em grande escala -Indicativos aproximados - Estudos não consideram ocorrência de riscos toleráveis (secas e geadas)	- Estudos não consideram ocorrência de riscos toleráveis (secas e geadas) -Potencial climático para o estabelecimento das culturas agrícolas	- Estudos não consideram ocorrência de riscos toleráveis	- Estudos não consideram informações referentes à microclimas - Interpolação de dados

Fonte: Wollmann & Galvani (2013).

2.2 Modelo de Cultivo

Segundo Kasampalis et al., (2018), modelo é uma representação esquemática da concepção de um sistema ou de um acto mimico ou de um conjunto de equações, que representa o comportamento de um sistema. Além disso, um modelo é “uma representação de um objecto, sistema ou ideia de alguma forma diferente da própria entidade”. Sua finalidade geralmente é ajudar a explicar, compreender ou melhorar o desempenho de um sistema.

Modelo de cultivo traduz a relação entre as plantas e o seu meio ambiente, simulando processos fisiológicos em intervalos de tempo, principalmente diários, para estimar o rendimento das culturas no momento de produção agrícola. O conhecimento do rendimento esperado é fundamental a várias escalas, pois determina diversas decisões agronômicas e socioeconômicas que podem afectar a subsistência de uma grande percentagem da população global (Kasampalis et al., 2018).

Para Pasley et al., (2023), um modelo de cultivo é uma rede complexa de algoritmos simples, cada um descrevendo uma interação diferente e unindo todos os componentes do modelo.

Dentro da própria planta, as vias de alocação e realocação de biomassa e nutrientes constituem uma rede de suprimentos e demandas em constante mudança e interligada. Todavia, devido a esse acoplamento estreito, imprecisões ou incertezas em um processo serão potencialmente agravadas em outro processo a jusante. Cada etapa do processo de construção do modelo deve ser tomada com o objectivo de tornar o modelo o mais simples e baseado em dados possível para reduzir o risco de tais incertezas. Segundo o autor, o objectivo de um modelo de cultivo é simular o crescimento da planta como o produto de uma série de interações entre a planta, o solo, o clima e o manejo.

Os sistemas são redes ou ciclos de componentes em interação. Mudanças em um componente de um sistema produzem mudanças em outros componentes devido às interações. Por exemplo, uma mudança no clima quente para húmido, pode levar ao desenvolvimento mais rápido de uma doença nas plantas, a uma perda no rendimento de uma cultura e à consequente adversidade financeira para os agricultores individuais e, portanto, para a população de uma região. A maioria dos sistemas naturais são complexos. Muitos não têm limites (Radha & Murthy, 2015).

O biosistema é composto por uma interação complexa entre o solo, a atmosfera e as plantas que nele vivem. Uma alteração casual de um elemento pode produzir consequências desejáveis e indesejáveis. Minimizar o indesejável e ao mesmo tempo atingir o resultado desejado é o principal objectivo. Em qualquer trabalho de engenharia relacionado à meteorologia agrícola o uso de modelação matemática é essencial. Das diferentes técnicas de modelação, a modelação matemática permite prever o comportamento do projecto, mantendo os gastos no mínimo. Os sistemas agrícolas são basicamente ecossistemas modificados. Gerenciar esses sistemas é muito difícil. Esses sistemas são influenciados pelo clima tanto em comprimento quanto em largura. Portanto, estes têm de ser geridos através de modelos de sistemas que só são possíveis através da experiência clássica em engenharia (Radha & Murthy, 2015).

2.2.1 Classificação dos Modelos

De acordo com Haefner (2005), os modelos podem ser classificados em dois grupos, nomeadamente: quanto as formas dos modelos e quanto a classificação matemática.

a) Formas dos Modelos

Nem todos os modelos científicos são precisos, numéricos ou quantitativos. Existem quatro formas:

1. Conceptual ou Verbal: descrições em uma linguagem natural;
2. Diagramática: representações gráficas dos objectos e relações (exemplo: diagramas fisiológicos de vias metabólicas, como o ciclo de Krebs);
3. Física: uma maquete física real de um sistema ou objecto real (maior ou menor: um modelo de DNA de 'brinquedo');
4. Formal: matemático (geralmente usando álgebra ou equações diferenciais).

b) Classificação dos Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos, incluindo os sistemas de cultivo, podem ser classificados em diferentes categorias com base em critérios que tratam de vários aspectos do modelo (Gershenfeld, 1999):

1. Representação de processos: Os modelos matemáticos podem ser divididos de acordo com a forma como os processos são representados (Monteith, 1996). Modelos orientados a processos são representações explícitas de processos mecanicistas no sistema. Causa e efeito são descritos em equações e essas relações são usadas para criar o modelo. Os modelos empíricos baseiam-se em equações estatísticas que não representam os processos mecanicistas. Um modelo de regressão que relaciona o rendimento das culturas num determinado ambiente com a temperatura média e a precipitação total durante a estação de crescimento é um modelo empírico. Deve-se notar que todos os modelos orientados a processos se tornam empíricos em um ou mais níveis organizacionais inferiores;
2. Estático versus dinâmico: um modelo estático não leva em conta o elemento tempo, enquanto um modelo dinâmico o faz. Em outras palavras, num modelo estático, o desenvolvimento do estado futuro do sistema não é previsto, enquanto um modelo dinâmico tem a capacidade de prever as condições futuras do sistema. Os modelos dinâmicos normalmente são representados por diferenças ou equações diferenciais (Haefner, 2005);

3. Contínuo versus discreto: em modelos contínuos, a matemática representa o tempo continuamente, portanto o tempo pode assumir qualquer valor (por exemplo: 2,3 dias), mas em modelos discretos o tempo é apenas um número inteiro (por exemplo: 2 dias);
4. Determinístico versus estocástico: em um modelo determinístico, cada conjunto de estados de variáveis é determinado exclusivamente por parâmetros no modelo e por conjuntos de estados anteriores dessas variáveis. Portanto, os modelos determinísticos funcionam da mesma maneira para um determinado conjunto de condições iniciais. Por outro lado, num modelo estocástico, a aleatoriedade está presente e os estados das variáveis não são descritos por valores únicos, mas sim por distribuições de probabilidade. Modelos estocásticos são usados em ecologia populacional e geração de dados meteorológicos em meteorologia (Haefner, 2005).

Considerando a classificação acima mencionada, os modelos usados no presente estudo são modelos matemáticos, orientado a processos, descritivo, dinâmico, discreto e determinístico.

2.4 Cadeia de Calculo ACME

O ACME (*Agile Crop Model Ensemble* ou Conjunto Flexíveis de Modelos Cultivo): é um conjunto de modelos de cultivo dinâmicos, diários, usados para simular variáveis-chave de interesse nas interações entre o sistema de cultivo (incluindo solo) e o clima. Cada modelo no ACME existe na forma de: i) software, um arquivo executável, compilado para sistema operacional Windows ou Linux, e ii) código, seu código em uma linguagem de programação, compilado para obter o modelo de software, e contendo as equações matemáticas traduzidas em um programa de computador e as instruções que gerenciam as entradas e saídas de e para um sistema de arquivos específico para cada modelo (ARISE, 2020).

O ACME faz a gestão dos três seguintes modelos de cultivo: DSSAT, STICS e CELSIUS. Os três modelos fizeram parte do estudo sobre intercomparação de modelos para pequenos agricultores com baixo consumo de factores de produção na Africa Subsariana e provaram estar entre os modelos de cultivo mais precisos para prever o rendimento do grão de milho e biomassa global acima do solo (Falconnier et al., 2020). Qualquer modelo de cultivo pode ser incluído no ACME, desde que seja executável independentemente de qualquer interface gráfica do usuário que exija acção do usuário para iniciar uma simulação.

2.4.1 Componentes do ACME

O ACME é um pacote que consiste em i) um conjunto de modelos de cultivo, ii) uma base de dados que permite a gestão dos dados de entrada e saída destes modelos de cultivo (*MasterInputOutput*), iii) uma base de dados contendo tabelas de correspondências entre as variáveis do *MasterInputOutput* e as variáveis consideradas nos diferentes modelos agrícolas (*ModelDictionary*), e iv) o software que gera os fluxos de dados entre esses componentes e executa os modelos de cultivo, denominado *DataMill* (Giner et al., 2024). Esses componentes principais são detalhados a seguir.

MasterInputOutput - é a base de dados que contém uma seleção das variáveis de entrada necessárias para executar o ACME e uma seleção de variáveis de saída. Os nomes e unidades dos conjuntos de variáveis, são denominados respectivamente por entradas e saídas ACME, e foram identificados por uma equipe de agrónomos como o conjunto mínimo de variáveis a serem levadas em conta na avaliação da dependência dos sistemas de cultivo em relação aos riscos climáticos (ARISE, 2020).

O número total de entradas (ou saídas) de um modelo específico é maior ou igual ao número de entradas (ou saídas) ACME. Algumas entradas de um determinado modelo podem ser idênticas a alguma entrada ACME e a alguma entrada de um modelo específico para um ou mais modelos no ACME. Entre eles, alguns podem compartilhar exactamente o mesmo nome e unidades a serem usadas nos arquivos de entrada, e alguns podem diferir em um ou em ambos os recursos. Algumas entradas podem ser específicas do modelo. Dentre estes, pode haver alguma proximidade de conceitos para que uma transformação matemática possa ser construída para vincular as duas entradas. As entradas do ACME são organizadas em tabelas correspondentes a cada componente-chave do sistema de cultivo a ser simulado com o ACME (por exemplo: solo, clima, plantas, e manejo da cultura) (Giner et al., 2024).

ModelDictionary - é uma base de dados que contém: i) a lista de variáveis de entrada e saída ACME com sua fonte, descrição e tipo (por exemplo: número real ou inteiro, texto, booleano); ii) a lista de variáveis de entrada de todos os modelos de cultivo no ACM (variáveis de entrada do modelo específico); iii) os dados que definem a ligação entre as entradas ACME e as entradas específicas do modelo para cada modelo de cultivo no ACME, incluindo a transformação matemática aplicada para garantir a correspondência entre as entradas específicas do modelo e as entradas ACME, sempre que aplicável, iv) valores fixos

padrão do modelo específicas de entradas que não estão relacionadas a nenhuma entrada ACME (ARISE, 2020).

DataMill - é um código executável, escrito em VB.net. Ele lê entradas ACME no *MasterInputOutput*. Para cada entrada específica do modelo, ele define um valor seguindo o *link* definido em *ModelDictionary*, ou seja, usa o valor padrão ou aplica transformação matemática. Em seguida, cada entrada específica do modelo é gravada no sistema de arquivos nativo do modelo. O *DataMill* pode lançar simulações de modelos e distribuir as tarefas de computação pelos núcleos do processador. Finalmente, o código lê as variáveis de saída selecionadas no sistema de arquivos nativo de cada modelo de cultivo e as grava na base de dados *MasterInputOutput*. A tabela de entrada principal do *MasterInputOutput* contendo a lista de unidades de simulação é indexada com um identificador único, que é utilizado para nomear os arquivos no sistema de arquivos nativo dos modelos. Graças a isso, as saídas e entradas da simulação podem ser recuperadas de forma imediata e segura para comparações e amostragem de dados (ARISE, 2020).

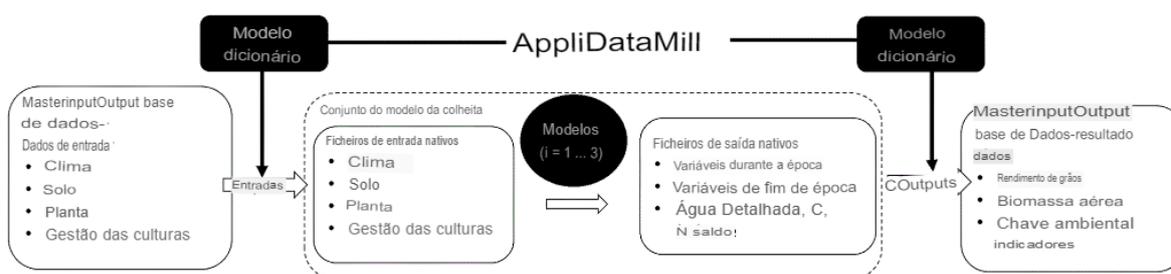


Figura 1: Gestão de entrada e saída ACME – *DataMill*.

Fonte: Giner et al., (2024).

2.5 Definição de Rendimento da Cultura

Rendimento Potencial (Y_0) - é o rendimento de uma cultura actual quando cultivada em ambientes no qual esta adaptada, sem limitação de nutrientes e água, e com pragas, doenças, ervas daninhas, acamamento e outros stresses controlados (FAO & DWFI, 2015; Van Ittersum et al., 2013; Evans & Fischer, 1999; Van Ittersum & Rabbinge, 1997). O rendimento potencial depende da localização no que se refere ao clima, mas é independente do solo, que se presume ser físico e quimicamente favorável ao crescimento da cultura (FAO & DWFI, 2015).

Os factores climáticos que influenciam no Y_0 são a radiação solar, a concentração de CO_2 e temperatura do ambiente (FAO & DWFI, 2015). O Y_0 é a referência mais relevante para sistemas irrigados ou sistemas em climas húmidos com abastecimento de água adequado para evitar défices hídricos (Van Ittersum et al., 2013).

O rendimento limitado pela água (Y_w) - é semelhante ao Y_0 , excepto que o rendimento das culturas é limitado pelo abastecimento de água e, portanto, influenciado pelo tipo de solo (capacidade de retenção de água e profundidade das raízes) e pela topografia do terreno (escoamento superficial). Esta medida de rendimento é relevante para avaliar as culturas em sequeiro (FAO & DWFI, 2015; Van Ittersum et al., 2013).

O rendimento limitado por nutrientes (Y_n) - depende da localização, principalmente devido aos efeitos das propriedades do solo na disponibilidade de nutrientes (Woittiez et al., 2017). Tanto o Y_0 como Y_w são definidos pelo tipo de cultura, variedade, clima, tipo de solo (Y_w) e abastecimento de água (Y_w) e, portanto, tanto Y_0 como Y_w são altamente variáveis entre e dentro das regiões (Van Ittersum et al., 2013). O rendimento limitado por água e nutrientes (Y_{wn}) é representado pelo Y_w mais Y_n .

O rendimento médio (Y_{med}) - é definido como o rendimento realmente alcançado no campo de um agricultor. Para representar a variação no tempo e no espaço em uma região geográfica definida, é definido como o rendimento médio (no espaço e no tempo) alcançado pelos agricultores da região sob as práticas de manejo mais utilizadas (data de sementeira, maturidade da variedade e densidade de plantas, manejo de nutrientes e proteção de culturas). O número de anos utilizado para estimar Y_{med} deve ser um compromisso entre a variabilidade nos rendimentos e a necessidade de evitar efeitos confusos das tendências temporais dos rendimentos devido a alterações tecnológicas ou climáticas (Van Ittersum et al., 2013).

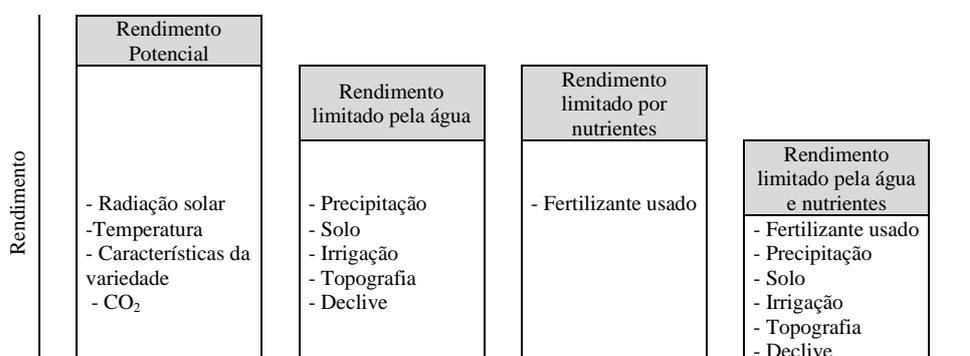


Figura 2: Diferentes níveis de produção e os factores de contribuição.

Fonte: Van Ittersum et al., (2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da Área de Estudo

Moçambique está localizado na costa sudeste da África, entre os paralelos 10° 27'S e 26° 52'S e os meridianos 30° 12'E e 40° 51'E (Figura 3) e possui uma área aproximadamente de 783.000 Km², dos quais 13.000 Km² são de águas interiores (Hoguane, 2007). O país está dividido em onze províncias nomeadamente: Maputo Província, Maputo Cidade, Gaza e Inhambane na região sul, Manica, Sofala, Tete e Zambézia na região centro, e Niassa, Nampula e Cabo-Delegado na região norte (Ussalu & Bassrei, 2023).

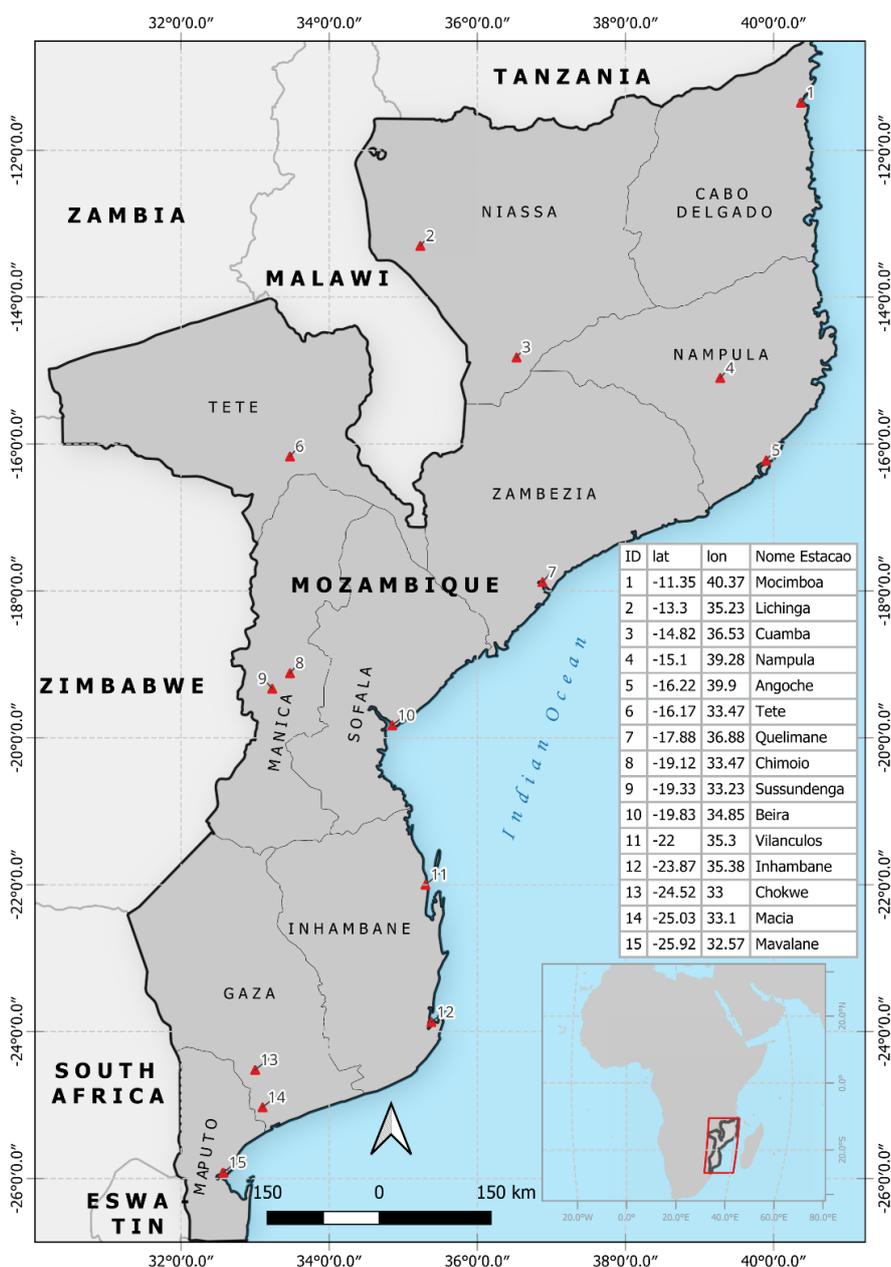


Figura 3: Mapa de Moçambique com os seus limites provinciais, e os 15 pontos geográficos.

Foram seleccionados 15 (quinze) pontos geográficos em todo o território nacional, correspondentes as estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM), de forma a garantir uma representação abrangente da diversidade das condições agroclimáticas em Moçambique.

3.1.1 Classificação do Clima em Moçambique

O clima de Moçambique classifica-se essencialmente em: tropical húmido, tropical seco, tropical semi-árido e clima modificado pela altitude. O clima tropical húmido predomina nas províncias de Cabo Delgado, Nampula e Sofala (na região da Beira). O clima tropical seco, ocorre em regiões como Inhambane (Mabote), Gaza (Chibuto), Maputo Província (Matutuine) e Tete. O clima tropical semi-árido, inclui apenas a província de Gaza (Pafuri). O clima modificado pela altitude, inclui áreas elevadas como Maputo Província (Namaacha), Manica (Chimoio), Tete (Chiputo), Niassa (Lichinga) e Zambezia (Gurue) (MINED, 1986).

O clima tropical húmido, caracteriza-se por ter temperaturas médias anual de aproximadamente 25 °C, uma estação chuvosa que vai de fins de Novembro a fins de Abril. A humidade relativa com valor médio de 72%, e as precipitações anuais à volta dos 1000 mm. O clima tropical seco, as temperaturas médias oscilam entre os 22 °C e os 26 °C, com desvios maiores em virtude da continentalidade, o mês mais fresco é Julho e o mais quente é Dezembro. A humidade relativa é menor do que no litoral e varia entre os 66% e os 70%, e a precipitação também é bastante baixa oscilando entre os 400 e os 800 milímetros anuais, aumentando de Sul para Norte, com máximos nos meses da estação quente (Novembro a Março) e mínimos na estação fresca (Maio-Agosto). O clima tropical semi-árido, a temperatura média anual oscila entre os 22 °C e os 30 °C, a precipitação média anual varia entre os 100 e os 600 mm e a humidade relativa oscila entre os 68% e os 74%. O clima modificado pela altitude, compreende uma série de pequenas áreas em que a altitude ultrapassa os 1000 m. A temperatura média anual, oscila entre os 18 °C e os 21 °C, a humidade relativa varia entre os 64% e os 77%, com um carácter mais ou menos constante. A precipitação confina-se entre os 1000 e os 1500 mm, com frequência de 90 a 100 dias (Dos Muchangos, 1999; Greigh De Brito, 2009).

3.1.2 Factores que Influenciam o Clima em Moçambique

Os principais factores que influenciam o clima em Moçambique são: El Niño Oscilação Sul (ENSO), o Dípolo do Oceano Indico (IOD), o Dípolo da Região Subtropical do Oceano Indico (SIOD), os Anticiclones (do Índico e do Atlântico), a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), Oscilação Madden-Julian (MJO), continentalidade, cobertura vegetal, Latitude e Altitude ou Relevo (INAM, 2023).

El Niño Oscilação Sul (ENSO) – é um fenómeno associado a anomalias nos ventos alísios e nas temperaturas da superfície do oceano pacifico. O fenómeno ENSO apresenta duas fases, a fase quente (positiva) e a fase fria (negativa). A fase quente ou positiva é chamada de El Niño e a fase fria ou negativa é chamada de La Niña (Medeiros et al., 2016).

Portanto, El Niño, representa o aquecimento anormal das águas do Pacífico Equatorial acompanhado de uma diminuição de pressão atmosférica na região e normalmente esta associado a períodos de seca. A La Niña representa o fenómeno contrário ao El Niño, estando associado a períodos húmidos (Berlato et al., 2024).

O El Niño influencia no consideravelmente o clima em Moçambique observando-se longos períodos de seca (INAM, 2023). O ENSO geralmente inicia no começo de um ano, atingindo a máxima intensidade durante mês de Dezembro do mesmo ano e Janeiro do ano seguinte e, enfraquece na metade do segundo ano. Com a ocorrência deste fenómeno, modificam-se as condições de temperatura, de precipitação e humidade, o que condiciona o rendimento agrícola (Mazive et al., 2018). Com a ocorrência do fenómeno El Niño, modificam-se as condições de temperatura, de precipitação e humidade, o que condiciona o rendimento agrário (Medeiros et al., 2016).

O Dípolo do Oceano Indico (IOD) – também conhecido como “Niño Indiano”, é oscilação irregular das temperaturas da superfície do mar em que o Oceano Índico ocidental torna-se altamente mais quente (fase positiva) e depois fria (fase negativa) do que a parte oriental do oceano (De Souza & Reboita, 2021). Durante a fase positiva do IOD, as águas quentes são empurradas para a parte ocidental do Oceano Índico, enquanto as águas frias e profundas são trazidas a superfície no Oceano Indico oriental. Este padrão é invertido durante a fase negativa do IOD (Kumar et al., 2020).

O IOD desempenha um papel fundamental no clima local. Durante a fase positiva do IOD, as temperaturas elevadas ao longo da costa da África provocam chuvas fortes e secas na

Austrália. Na fase negativa, os padrões de temperaturas e precipitação invertem-se. Além disso, as alterações do nível do mar associadas ao IOD podem também conduzir a um aumento das ameaças de inundações costeiras e impactos associados (Kumar et al., 2020). Em Moçambique, o IOD tem maior influência sobre a precipitação. Um IOD positivo pode reduzir as chuvas de inverno, agravando potencialmente os efeitos de seca associados ao El Niño (INAM, 2023).

Dípolo da Região Subtropical do Oceano Índico (SIOD) – é caracterizado pela oscilação das temperaturas da superfície do mar em que o sudoeste do Oceano Índico (sul de Madagáscar) é mais quente e mais frio do que a parte orientada (Behere & Yamagata, 2001). Geralmente, o SIOD se desenvolve em Dezembro a Janeiro com o pico em Fevereiro, decai nos meses seguintes e finalmente se estabiliza em Maio a Julho. O processo de evolução e deformação do evento SIOD é altamente afectado pela posição do alto subtropical (De Souza & Reboita, 2021).

Segundo Behere & Yamagata (2001), o padrão de temperatura da superfície do mar observado na região subtropical do oceano Índico na escala interanual, apresenta-se em duas regiões com padrões diferentes e opostos. Este dipolo é conhecido como Dipolo do Oceano Índico Subtropical (SIOD), com duas fases distintas que influenciam significativamente o clima em várias regiões, uma positiva e a outra negativa.

A fase positiva do SIOD é caracterizada por temperaturas da superfície do mar mais quentes que o normal na parte sudoeste do Oceano Índico, e temperaturas mais frias do que o normal na Austrália. Essas condições, resultam em precipitações acima do normal em diversas regiões ao longo da África do Austral e Central (Salvekar et al., 2000), incluído Moçambique (Chongue & Nishii, 2023).

Por outro lado, a fase negativa do SIOD é caracterizada por um padrão oposto, com temperaturas da superfície do mar mais frias na parte sudoeste do Oceano Índico, e mais quente na parte oriental. O que resulta frequentemente na redução da precipitação durante a época chuvosa em Moçambique. Durante esta fase, Moçambique poderá sofrer condições de seca, afectando particularmente a produção e produtividade das culturas e a disponibilidade de água, com uma evolução típica no período entre Dezembro e Janeiro (Behere & Yamagata, 2001).

Anticiclones (do Índico e do Atlântico) – é um sistema meteorológico caracterizado por um centro de alta pressão atmosférica, onde a pressão é superior à das áreas circundantes. A

presença de um anticiclone pode levar ao aumento das temperaturas e redução da precipitação, particularmente em regiões como Moçambique, onde podem causar períodos curtos de seca durante a época chuvosa (Degola, 2013).

Existem três tipos de anticiclones: os polares, os migratórios e os semipermanentes. Os anticiclones polares, formam-se perto dos polos e caracterizam-se por ar frio e denso que desce, levando a alta pressão. Os anticiclones migratórios, deslocam-se entre regiões e estão frequentemente associados a mudanças nos padrões climáticos. Podem influenciar os climas locais à medida que viajam. Os anticiclones subtropicais, também conhecidos como semipermanentes, são os maiores sistemas quentes de alta pressão encontrados perto de 30° de latitude. São caracterizados por extensas áreas de ar seco e descendente e são influenciados pela intensa radiação solar (Nimer, 1989).

O tipo de anticiclone mais predominante em Moçambique é o anticiclone subtropical. Estes sistemas são caracterizados por extensas áreas de descida de ar seco e quente, que influenciam significativamente os padrões climáticos locais. A ocorrência típica dos anticiclones subtropicais perto da latitude 30°, alinha com as condições climáticas vivenciadas em Moçambique. São particularmente proeminentes durante a estação seca, que se estendem de maio a outubro (Degola, 2013).

Zona de convergência inter-tropical (ITCZ) – é uma zona de baixas pressões, onde convergem diferentes massas de ar (tropical marítimo subsidente, alísio SE e equatorial do norte, alísio NW) e criam-se nuvens de desenvolvimento vertical (nuvens convectivas) que provocam grandes regimes de precipitação.

Este é um fenómeno migratório, que se desloca periodicamente, do hemisfério Norte para hemisfério Sul e (vice-versa), normalmente, da seguinte forma: entra no hemisfério Sul em princípios de Novembro, alcança o Niassa em Dezembro e a Beira, ponto mais no sul em Fevereiro cerca de 17°S, o extremo.

Oscilação Madden-Julian (MJO) – é oscilação Intra-sazonal que tem como fonte as anomalias positivas de temperatura da superfície do mar (TSM) no oceano Índico. A Oscilação Madden-Julian se desloca para leste e seu ciclo se completa entre 60-90 dias (Madden & Julian, 1972). Ao longo de um ciclo, a Oscilação Madden-Julian é caracterizada por 8 fases que são indicativas da localização dos máximos de actividade convectiva (De Souza & Reboita, 2021).

Continentalidade – esta relacionado com o afastamento das regiões do mar, pois quanto maior a distância da localidade em relação ao mar, menos recebe humidade proveniente do oceano, ou seja, se perde o efeito da maritimidade (Martins, 2022). O continente se aquece e se esfria mais rapidamente que as superfícies dos oceanos, que possuem a propriedade de misturar o calor recebido a maiores profundidades, ao contrário do solo, de forma geral, muito mais opaco. O que directa ou indirectamente gera inversões dos centros de alta e baixa pressões, alterando, por consequência, a direcção dos ventos, como pode ser observado nos casos das brisas marítimas e terrestres (Torres & Machado, 2008).

Assim, o efeito da maritimidade atenua as diferenças térmicas, homogeneizando as temperaturas costeiras. Já o efeito da continentalidade, é inverso, ou seja, nas áreas “interiores”, mais afastadas da costa, as amplitudes térmicas diárias, sazonais e anuais tendem a ser maiores (Torres & Machado, 2008).

Cobertura vegetal – desempenha um papel relativamente no clima, sobretudo através de seus elementos: humidade, precipitação, temperatura, radiação solar, insolação e ventos. extremamente importante (Torres & Machado, 2008). O clima é o principal determinante do tipo de vegetação, sendo a presença de matas, bosques e campos, por exemplo decidida em geral pela quantidade de chuvas, mas por sua vez, a vegetação age poderosamente sobre o clima. Tem se assim que a densa vegetação das áreas intertropicais, por exemplo, com sua enorme evapotranspiração, aumenta a humidade do ar, facilitando a produção de chuvas. As matas influenciam na temperatura, especialmente nas máximas, que são mais moderadas em função da sombra que proporciona, do calor que absorvem e da evaporação da água que transpirem (Miller, 1975).

Os processos de troca de energia e humidade entre o solo e o ar são mais directos e efectivos naquelas superfícies marcadas pela ausência de vegetação, como desertos e rochas aflorantes. Já nas áreas urbanizadas, esses processos assumem ampla complexidade, em decorrência da diversidade espacial que as superfícies urbanas apresentam e da dinâmica das actividades desenvolvidas nas cidades (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

Latitude – é um importante factor do climático, pois retrata a acção de alguns condicionantes astronómicos na quantidade de energia que entra no Sistema Superfícies-Atmosfera, como: i) rotação da Terra sobre o seu eixo, a definição da noite e do dia implica uma diferenciação na entrada de energia, considerando os hemisférios diurnos ou noturno da Terra, em decorrência da maior ou menor duração do dia da noite associada ao aumento da latitude; ii)

a inclinação desse eixo sobre o plano que a Terra descreve em seu movimento ao redor do sol (eclíptica), limitando a máxima intensidade de energia a uma restrita faixa compreendida entre o Trópico Capricórnio (23°23' S) e o Trópico de Câncer (23°23' N); iii) o próprio movimento de translação, que promove uma distribuição sazonal da energia solar sobre a Terra, de modo a se ter simultaneamente maior recepção de energia em um hemisfério do que no outro; iv) a distância entre os dois astros, a diferença de tamanho entre eles e a forma esférica aparente da Terra, que fazem com que os raios solares atinjam o Planeta paralelamente, de forma que a entrada de energia no topo da sistema Superfície-Atmosfera seja a mesma em qualquer ponto (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

A latitude do lugar, como também a época do ano, define o ângulo com que os raios do sol irão incidir sobre a superfície daquele lugar (as 12 horas locais), o que implica a disponibilidade de energia de dado local dependendo do ângulo com que a energia perpassa no sistema superfície-Atmosfera. Vale dizer que, quanto mais perpendicularmente incidir um feixe de raios solares, menor será a área da superfície por ele atingida; assim, haverá uma maior concentração de energia por unidade de área do que quando a incidência é oblíqua. Como o processo de transferência de energia da superfície para o ar é o principal responsável por seu aquecimento, a razão de aquecimento do ar será na mesma proporção da intensidade de energia absorvida ou retida na superfície (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

Relevo – o relevo apresenta três atributos importantes na definição dos climas: posição, orientação de suas vertentes e declividade. A posição do relevo favorece ou dificulta os fluxos de calor e humidade entre áreas contíguas. Um sistema orográfico que se disponha latitudinalmente em uma região, dificulta as trocas de calor e humidade entre as áreas frias e quentes. Nas zonas mais carentes de energia solar (latitudes extra-tropicais) a orientação do relevo em relação ao sol irá definir as vertentes mais aquecidas e mais secas, e aquelas mais frias e mais húmidas. Tomando o exemplo do hemisfério sul, as vertentes mais quentes serão aquelas voltadas para Norte, pois, nesse hemisfério, o Sol estará sempre no horizonte Norte, deixando à sombra as vertentes voltadas para o Sul. As regiões que possuem sua superfície ondulada terão o factor declive modificado a relação superfície ou radiação incidente (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

3.2 Aquisição de dados

No presente estudo, usou-se dados climáticos espaciais descarregados na página electrónica do CHIRPS e do ERA5 para um período de observação de 20 anos (2003 a 2022). O CHIRPS é uma base de dado geoespacial de precipitação desenvolvido pelo USGS e pelo UCSB. Neste produto as estimativas de precipitação são compostas por diversas fontes de informação, nomeadamente: i) CHPCLim; ii) Observações de satélite com espectroscópio infravermelho termal (*Thermal Infrared*, TIR), geostacionárias quase globais da NOAA, CPC e o NCDC; iii) Campos de Precipitação do CFSv2; iv) Diversas observações de precipitação através de produtos de estações meteorológicas e outros serviços regionais (Funk et al., 2015).

Os dados do CHIRPS possuem uma resolução espacial de 0,05° de latitude e longitude, isto é, aproximadamente 5 km do tamanho da grade da imagem, próximo ao equador. A sua cobertura geográfica é de 50°S a 50°N, com dados de 1981 até os dias actuais e é disponibilizado em um conjunto de dados com uma resolução temporal em dia, pântadas, décadas, mensal e anual. Os dados do CHIRPS podem ser acessados livremente através do seguinte endereço electrónica (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>), no formato NetCDF, GeoTiff e Esri BIL (Costa et al., 2019).

ERA5 é uma base de dados geoespacial, que possui imagens de uma grande diversidade de variáveis climatológicas como temperatura do ar, precipitação, velocidade do vento, radiação solar, temperatura no ponto de orvalho, pressão na superficial do solo entre outros em diversas regiões do globo incluído Moçambique, disponíveis em 137 camadas da atmosfera o que confere ao ERA5 a capacidade de detectar fenómenos atmosféricos raros que outra base de dados. O ERA5 fornece dados de 1940 até aos dias actuais, com resolução temporal de 1 hora e uma resolução espacial de grade de 0,25° de latitude e longitude, ou aproximadamente a 30 km. Os dados do ERA5 também pode ser acessados livremente (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>), no formato NetCDF e .grib para os arquivos brutos e os processados em .zarr (Dos Santos Júnior et al., 2022).

Quanto ao Modelo Digital de Elevação (MDE), o mesmo foi adquirido na página electrónica do DIVA-GIS. Esta página electrónica, também é de acesso livre, e contem dados vectoriais assim como raster. Os dados vectoriais que podem ser encontrados são: limites administrativos, estradas, rios, linha férrea, entre outros. Quanto aos dados raster que podem ser encontrados, são: uso de cobertura do solo, clima e MDE.

Tabela 2: Variáveis usadas no estudo.

Variáveis	Fonte	Parâmetros	Unidades	Tempo	Resolução
Clima	ERA5	Radiação solar	MJ/m ² /dia	dia	0.25°
		Velocidade do vento a 2 m	m/s	dia	0.25°
		Temperatura (max, min, med) do Ponto de Orvalho a 2 m	°C	dia	0.25°
		Temperatura (max, min, med) a 2 m	°C	dia	0.25°
		Pressão na Superfície do solo	Pa	hora	0.25°
	CHIRPS	Precipitação	mm	dia	0.05°
	Calculado	Evapotranspiração Potencial (Penman Monteith - FAO 56)	mm	-	-
Terreno	DIVA-GIS	MDE	m	-	90 m
	Calculado	Declive (QGIS)	grau	-	-

Para cada parâmetro descrito na Tabela 2, foram extraídos dados observados (ver os dados diários das variáveis climáticas no seguinte link: https://1drv.ms/x/s!Al_RArg4kZxziLNUkVmdrAM-dyVh8w?e=mkPEGH, e parte dos dados no Apêndice 1) para os 15 locais seleccionados em diferentes regiões do país (ver Figura 3).

3.2.1 Formato dos dados

Os diferentes dados climáticos (referenciados na Tabela 2), foram obtidos no formato NetCDF. Segundo ESRI (2021), NetCDF (*Network Common Data Form*) é um formato de arquivo para armazenar dados científicos multidimensionais (variáveis), como temperatura, humidade, pressão, velocidade direcção do vento, entre outras. NetCDF foi projectado para ser um formato auto-descritivo, isto é, o próprio arquivo contém os dados e informações descritivas sobre os dados (GISGeography, 2019).

Um arquivo NetCDF codificado como um binário é composto de dimensões, variáveis e atributos. A dimensão é um número inteiro usado para especificar o formato de uma ou mais variáveis multidimensionais contidas em um arquivo NetCDF. Geralmente é usada para representar uma dimensão física real, como tempo, latitude, longitude ou altitude, mas também pode ser usada para indexar quantidades mais abstratas, como o ID de execução do modelo (Figura 4).

Uma variável de um arquivo NetCDF representa uma matriz multidimensional de valores do mesmo tipo. Ela possui um nome, um tipo de dados e uma forma descrita por sua lista de dimensões, todas especificadas quando a variável é criada. Cada variável também pode ter

valores de dados e atributos associados, que podem ser adicionados ou alterados após a criação da variável. As variáveis são usadas para armazenar a maior parte dos arquivos NetCDF e são principal componente utilizado pelos usuários para identificar subparte de um arquivo NetCDF.

Os atributos contêm informações sobre uma variável ou um arquivo NetCDF inteiro. Essas informações são dados auxiliares ou dados sobre dados, análogos as informações armazenadas nos dicionários e esquemas de dados nos sistemas de base de dados convencionais. Um atributo tem uma variável associada, um nome, um tipo de dados, um comprimento e um valor. Atributos individuais são identificados especificando uma variável e um nome de atributo (Sciolla & Borda, 2018).

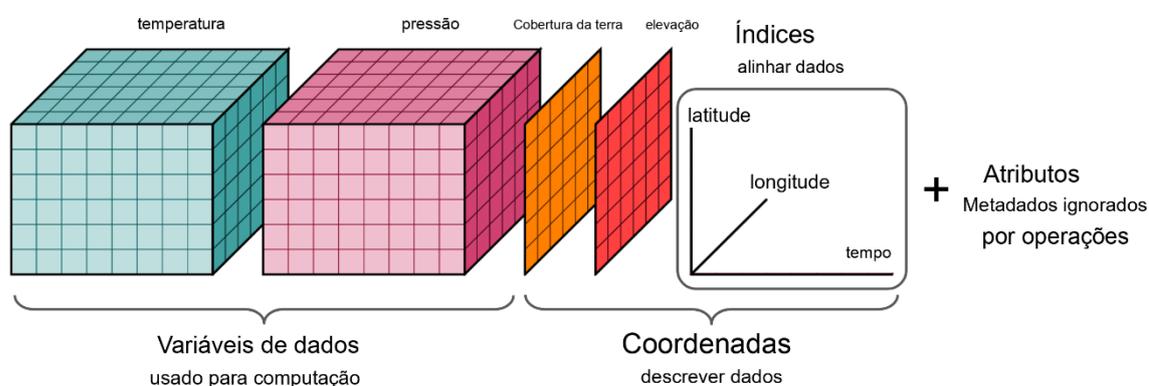


Figura 4: Composição de dados NetCDF.

Fonte: McClain (2023).

O MDE foi obtido no formato GeoTiff, que baseia-se no formato de arquivo TIFF (*Tagged Image File Format*), que é amplamente utilizado para armazenar imagens digitais. Todavia, o GeoTIFF adiciona informações georreferenciadas aos dados (de elevação do terreno), permitindo que sejam associados a coordenadas geográficas espaciais. Essa informação é armazenada dentro do arquivo, facilitando a interpretação e o processamento dos dados geoespaciais (GISGeography, 2019).

3.2.2 Extração dos Dados Adquiridos

A extração dos valores de cada parâmetro (mencionada na Tabela 3) para o MS Access de forma que a alcançar os objectivos do presente estudo, foram considerados as etapas ilustradas na Figura 5.

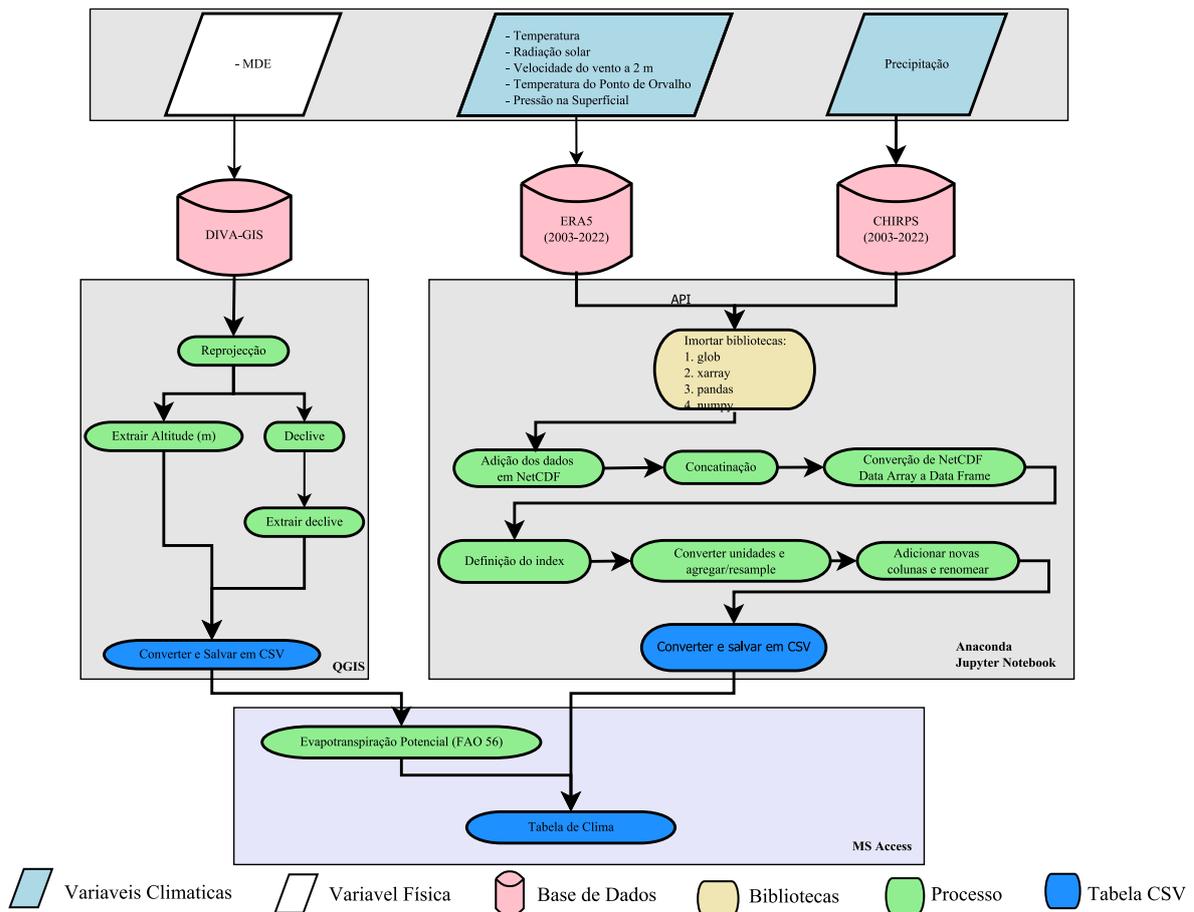


Figura 5: Diagrama resumindo o processo de extracção dos dados.

3.3 Variações espaço-temporais do clima em Moçambique no período de 2003 a 2022

Para a representação das variações espaço-temporal do clima em moçambique, recorreu-se a plataforma *Jupyter Notebook* no ambiente *Anaconda* versão 2.5.2. E com recurso a linguagem de programação *Python 3.10.9* e bibliotecas *numpy*, *matplotlib*, *geopandas*, *regionmask* e *xarray*, elaborou-se mapas de distribuição espacial das variáveis climáticas temperatura e precipitação.

Com o propósito de identificar as anomalias ou extremos climáticos, foram elaborados gráficos de linhas de variabilidade interanual e mapas de variação mensal da temperatura e precipitação. Para determinar o Índice de Anomalia das Chuvas (IAC), usou-se o método proposto por Costa et al., (2017) no seu estudo sobre *Space-time distribution of rainfall anomaly index (RAI) for the Salgado Basin, Ceará State-Brazil*.

Segundo o mesmo autor, o índice de anomalia das chuvas foi desenvolvido por Rooy (1965) e adaptado por (Freitas, 2005), é constituído pelas seguintes equações:

$$IAC = 3 * \left[\frac{N - \bar{N}}{\bar{M} - \bar{N}} \right] \quad \text{para anomalias positivas} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$IAC = -3 * \left[\frac{N - \bar{N}}{\bar{X} - \bar{N}} \right] \quad \text{para anomalias negativas} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: N = precipitação mensal de cada ano em que o IAC será gerado (mm); \bar{N} = precipitação média mensal da série histórica (mm); \bar{M} = média das dez maiores precipitações mensais da série histórica (mm); \bar{X} = média das dez menores precipitações mensais da série histórica (mm); e as anomalias positivas têm seus valores acima da média e as anomalias negativas têm seus valores abaixo da média.

Tabela 3: Classificação da intensidade do índice de anomalia da chuva.

	Intervalo de IAC	Classificação
Índice de Anomalia das Chuvas	Maior que 4	Extremamente húmido
	2 a 4	Muito húmido
	0 a 2	Húmido
	0	Normal
	-2 a 0	Seco
	-4 a -2	Muito seco
	Menor que -4	Extremamente seco

Fonte: Freitas (1998) adaptado por Maroneze et al., (2014).

3.4 Modelo Físico de Gestão de Base de Dados

O *MasterInputOutput* da cadeia de cálculos ACME, é uma base de dados operacional no Microsoft Access que contem uma selecção de variáveis de entrada necessárias para executar o ACME. Nele, as tabelas já foram criadas, nomeadas e relacionadas entre elas. E em cada tabela, as colunas também já foram nomeadas e definido o tipo de dado a introduzir, devendo apenas o usuário organizar os dados para facilitar no processo de preenchimento.

Para atender esses requisitos do *MasterInputOutput*, foram importadas separadamente todas as tabelas dos parâmetros indicados na Tabela 3. De seguida, fez-se uma análise individual da qualidade dos dados e a respectiva correcção do erro de observação do satélite. Dado que no presente estudo, os dados de entrada ACME são referentes ao clima, preencheu-se a devida a tabela em função das variáveis climáticas, 15 locais seleccionados e tempo de estudo.

Os dados climáticos (15 locais x 5 anos bissexto x 366 dias por ano + 15 locais x 14 anos comuns x 365 dias por ano = 104.100 observações de cada variáveis climáticas) importados

dos servidores de dados climáticos globais (CHIRPS e ERA5) foram inseridos na tabela de dados climáticos diários *MasterInputOutput 'RAClimateD'*. E a lista dos 15 locais com suas coordenadas foi inserida na tabela *'Coordinates'* vinculada um a muitos com *'RAclimateD'*.

Na tabela *'IncrementSD'* foi criado manualmente uma lista de 26 datas de sementeira (com intervalões de sementeira de 10 dias), na forma de lista de valores (240, 250, 260... a 490 dias julianos) que foram somados à primeira data de semeadura considerada na análise. Da mesma forma, uma tabela *'YearList'* lista os 19 anos simulados. Um tipo de solo foi adicionado às tabelas *'Soil'* vinculados um a muitos a *'SoilLayers'*, e seus parâmetros foram digitados manualmente. As três combinações de opções de simulação activadas ou inactivadas foram armazenadas na tabela *'SimulationOptions'*.

3.5 Experimento Virtual

Para identificar a dependência do risco climático no cultivo de milho e factores do sistema de cultivo, foi concebido um experimento virtual. Mais precisamente, usou-se o ACME para gerar, executar e analisar um experimento virtual cruzando factores-chave que determinam o desempenho agronómico e ambiental dos sistemas de cultivo:

- 26 datas de sementeira, com intervalos de 10 dias, cobrindo uma grande variedade de datas de sementeira, começando no início mais precoce da estação chuvosa em Moçambique;
- um tipo de solo com baixo teor de nitrogénio orgânico (0,015 KgN/100 Kg de solo em 0-30 cm) e capacidade típica de armazenamento de água de 105 mm/m com 180 cm de profundidade;
- uma cultura (milho);
- duas variedades de milho com durações de ciclo de cultura diferentes (1,6 variedade de ciclo curto e 1,7 variedade do ciclo longo) o que difere também no potencial de interceptação da radiação solar, mas também diferem na exposição a estresses hídricos e nutricionais;
- 19 anos de dados meteorológicos diários (2003-2021);
- 15 locais diferentes;
- 3 combinações de opções de simulação de estresse ou “cenários”: i) sem estresse para simular “rendimento potencial determinado somente por radiação e temperatura” (ou rendimento potencial, Y_0), ii) apenas estresse hídrico para simular “rendimento potencial

limitado por água” (Yw) e iii) com estresse de nitrogênio e hídrico ambos activados para simular o “rendimento limitado por água e nitrogénio” (Ywn).

Este experimento virtual resultou em $26 \times 1 \times 2 \times 19 \times 15 \times 3 = 44.460$ unidades de simulação para cada um dos três modelos no ACME, ou seja, um total de 133.380 simulações. Entretanto, para cada local, variedade e opção de simulação foi calculado, analisado e comparado o rendimento e a biomassa em função da data de sementeira.

3.6 Identificação da janela óptima de sementeira

Para a identificação da janela óptima de sementeira com o menor risco agro-climático na cultura de milho, em função do local, modelo de cultivo e variedade, foi com base nas 133380 unidades de dados na tabela '*SummaryOutput*' resultado da simulação do experimento virtual, onde: i) através de consultas SQL determinou-se a média do rendimento da cultura do milho agrupando o local e o modelo de cultivo (que resultou em 44460 unidades de dados); ii) após a verificação da conformidade dos dados, determinou-se o rendimento potencial relativo limitado pela água Ywrel ($Yw/Y0$) e o rendimento potencial relativo limitado pela água e nitrogénio Ywnrel ($Ywn/Y0$); iii) de seguida a média interanual (Ywrelmed e Ywnrelmed) do Ywrel e Ywnrel, respectivamente, do qual a posterior extraiu-se os valores máximos (MaxYwrelmed e MaxYwnrelmed), tendo resultado 15 unidades dados; iv) e assim, calculou-se o Ywrelmed e o Ywnrelmed com a probabilidade maior ou igual a 70% do MaxYwrelmed e MaxYwnrelmed, respectivamente; v) extraiu-se as datas de sementeiras máximas e mínimas para cada unidade resultante, e vi) no final foi feita a diferença entre as datas de sementeira máxima e mínima para obter-se a janela óptima de sementeira.

4. RESULTADOS

4.1 Distribuição espaço-temporal da variabilidade do clima em Moçambique no período de 2003 a 2022.

4.1.1 Distribuição espaço temporal da variabilidade da precipitação

A Figura 6, ilustra a variabilidade da precipitação média mensal através do diagrama de Tukey (*box plots*) no período de 2003 a 2022. Cada diagrama mensal é representado por traços horizontais, para a série de valores da precipitação nesse mês, o mínimo, o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o máximo, por marca de um círculo branco cheio, a média e, por marca de um rombo, os *outliers*.

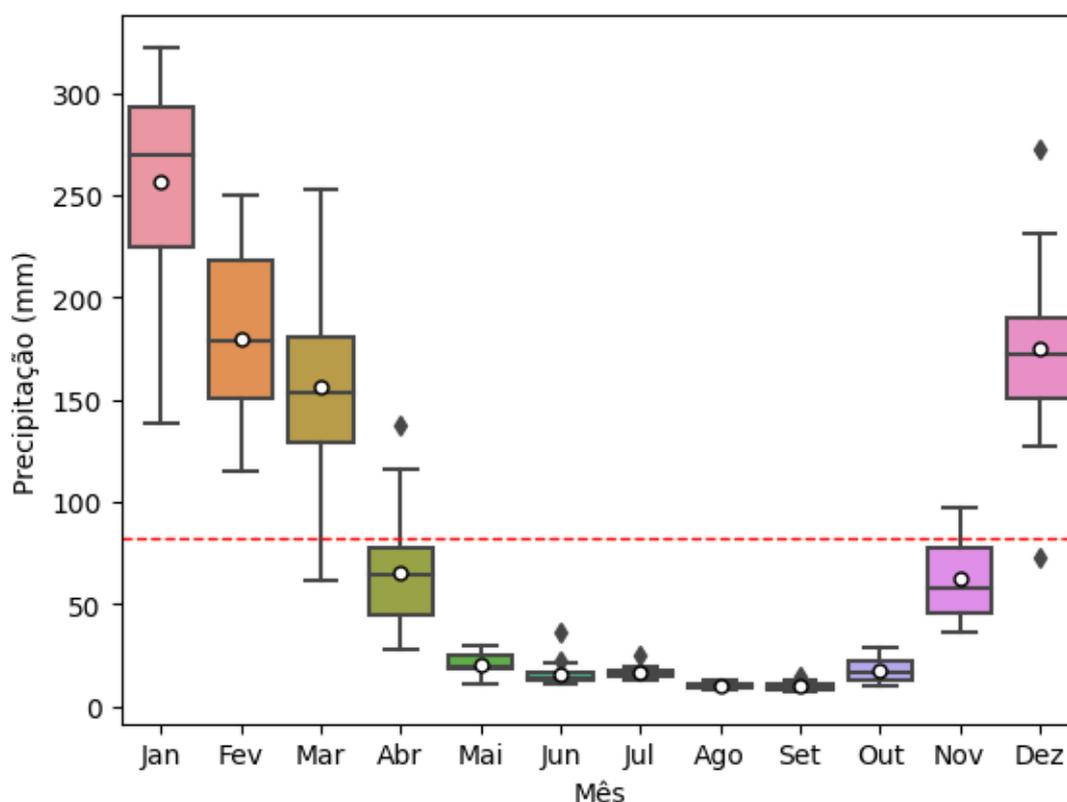


Figura 6: Diagrama de Tukey para a precipitação média mensal em Moçambique. Cada diagrama elementar, resulta da média mensal de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.

No geral, a Figura 6 evidencia que a precipitação é bem definida em Moçambique, e ocorre nos meses entre Novembro de um ano a Abril do ano seguinte, sendo os meses de Dezembro a Março com valores de precipitação acima da média mensal de 83 mm. O mês de Janeiro,

registra valor máximo de precipitação de 322 mm. Os restantes meses (Maio e Outubro), coincidem com a época seca e ocorrem precipitações baixas, com o mês de Setembro registando o valor mais baixo de precipitação de 7 mm.

A Figura 7, ilustra a distribuição espacial e temporal da precipitação média mensal por meio de mapas no período de 2003 a 2022 em Moçambique. Os mapas, nota-se algumas regiões que apresentam meses chuvosos e secos, a título de exemplo Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro, Março e Abril, como os meses húmidos e, os meses de Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro como os secos. Os meses de Abril e Novembro registam possibilidade de pequenas quantidades de chuva. Além disso, os resultados evidenciam que nos meses chuvosos verifica-se um aumento de precipitação da região sul em direção a região norte do país, e na medida que a distância aumenta do litoral na região norte do país. A precipitação diminui na região norte do país quando aumenta a distância ao litoral na época seca. Ao passo que na região sul do país a precipitação diminui do litoral para o interior do continente a qualquer que seja a época. Segundo Hipólito & Vaz (2017), em Moçambique existem três factores que influenciam mais na ocorrência da precipitação, nomeadamente: o relevo, a distância ao litoral e a latitude.

Segundo Hipólito & Vaz (2017), a latitude influencia na precipitação, já a região Norte de Moçambique apresenta um padrão de chuvas distinto da região Centro e Sul. Na região Centro e Sul, a precipitação se origina principalmente de frentes frias e ciclones, enquanto na região Norte, é o movimento da zona de convergência intertropical que gera centros de baixas pressões, sendo este o principal factor a considerar. Quanto ao relevo, os autores afirmam que este factor tem enorme influência na distribuição da precipitação em Moçambique, uma vez que as maiores precipitações anuais médias se registam exactamente nas zonas de maior altitude. E quanto a distância ao litoral, os autores referem que o mesmo é importante na medida em que as massas de ar húmido marítimo vão perdendo humidade à medida que progridem para o interior.

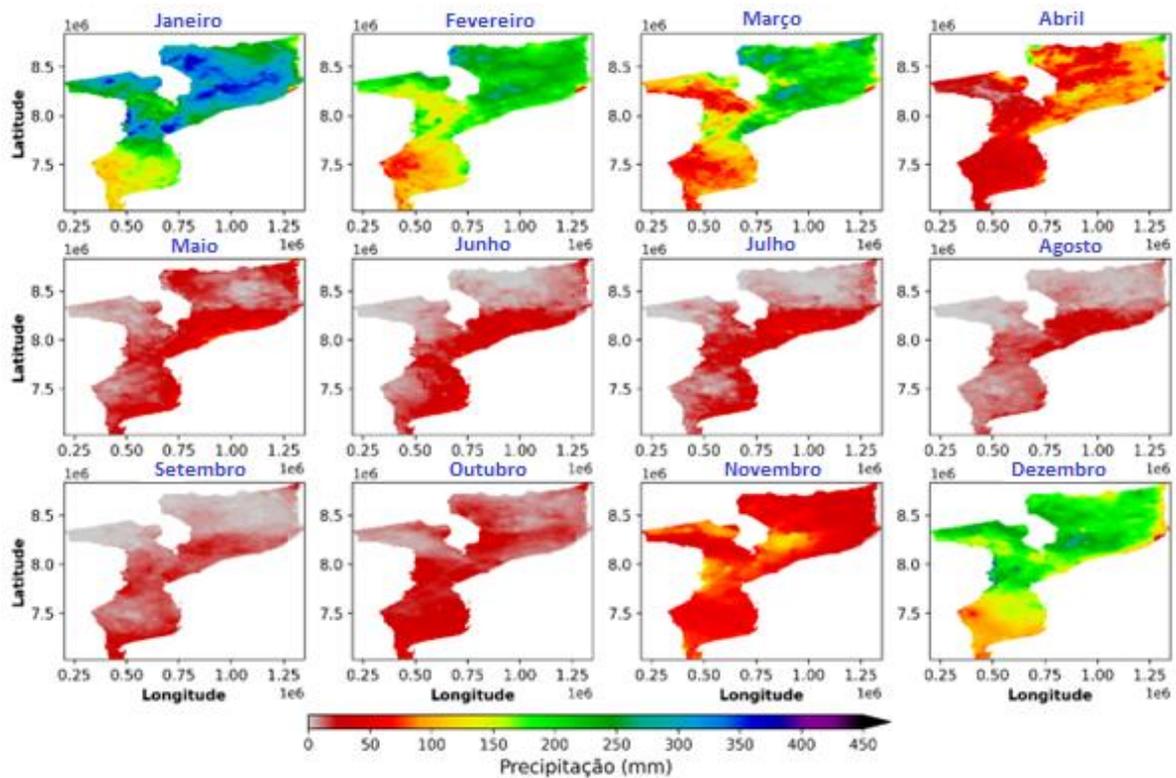


Figura 7: Mapa de distribuição espacial e temporal da precipitação mensal por pixel em Moçambique, observada (CHIRPS) entre 2003 a 2022.

A Figura 8, apresenta a variabilidade da precipitação em Moçambique no período de 2003 a 2022. A linha a vermelho, corresponde ao valor da precipitação média anual e, as linhas a azul tracejado, o desvio-padrão positivo e negativo contados a partir da precipitação média anual dos pixéis em Moçambique.

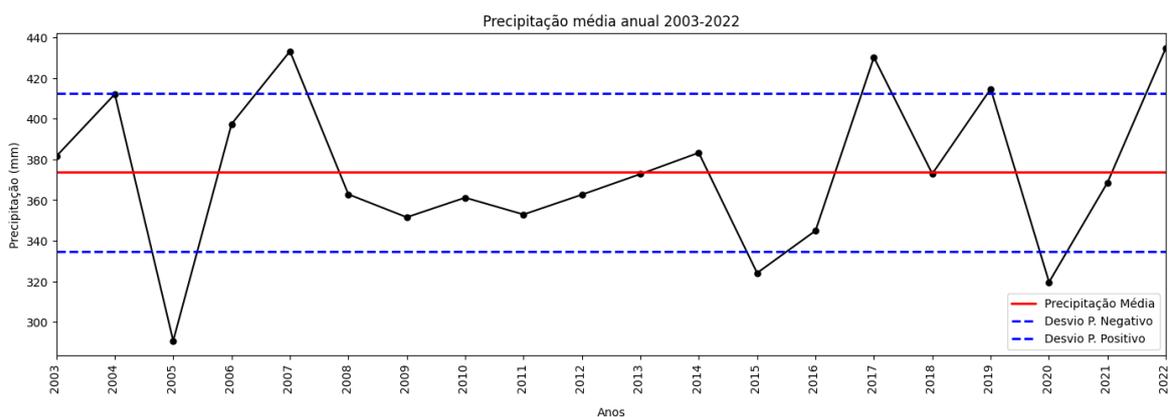


Figura 8: Variabilidade da precipitação em Moçambique entre 2003 a 2022. Cada valor da precipitação média anual, resulta da média de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.

A precipitação média anual é de 374 mm e o desvio-padrão da precipitação anual é de 39 mm. As precipitações mínimas e máximas registadas no período são respectivamente 291 mm em 2005 e 435 mm em 2022. Ainda na Figura 8, podemos observar a ocorrência de seis eventos anómalos de precipitação, sendo três de excesso de precipitação (2007, 2017 e 2022) e outros restantes três de escassez de precipitação (2005, 2015 e 2020) (Apêndice 2).

4.1.2 Índice de anomalias mensais padronizadas da precipitação

A Figura 9, mostra a variabilidade da precipitação mensal por meio do índice de anomalia padronizada no período de 2003 a 2022 em Moçambique. Nota-se uma flutuação da precipitação mensal, ou seja, momentos na série que as precipitações foram acima do padrão médio pluviométrico (em azul) e, outros momentos abaixo do padrão (em vermelho). Entre as duas décadas de observação, podemos destacar o mês de Setembro de 2013 e os meses de Abril e Junho de 2022 que foram classificados como muito húmidos (Apêndice 3 e 4).

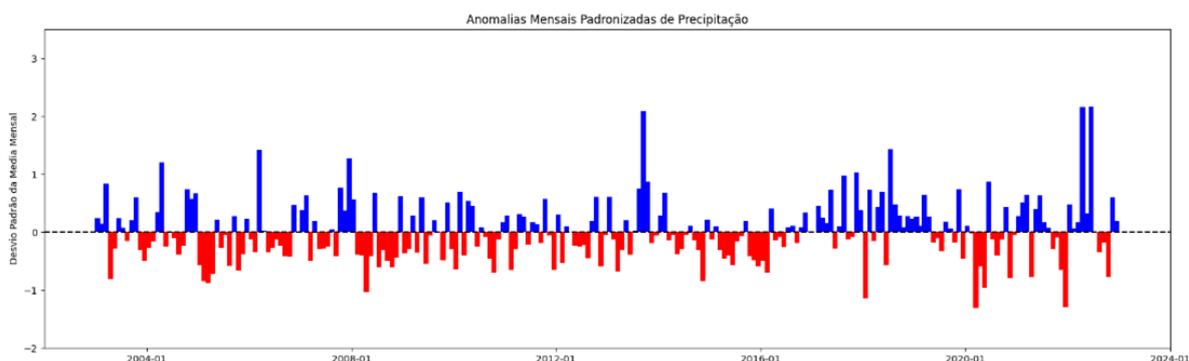


Figura 9: Índice padronizado de anomalia mensais da precipitação por pixel em Moçambique para o período 2003 a 2022.

4.1.3 Distribuição espaço temporal da variabilidade da temperatura

A Figura 10, ilustra a variabilidade da temperatura média mensal através do diagrama de Tukey (*box plots*) no período de 2003 a 2022. A temperatura mínima e máxima registada no período são respectivamente 19,5 °C em Julho e 28,6 °C em Dezembro. Os seis meses desde Outubro até Março apresentam temperaturas maiores que a média mensal de 24,4 °C e, os restantes meses apresentam temperaturas inferiores.

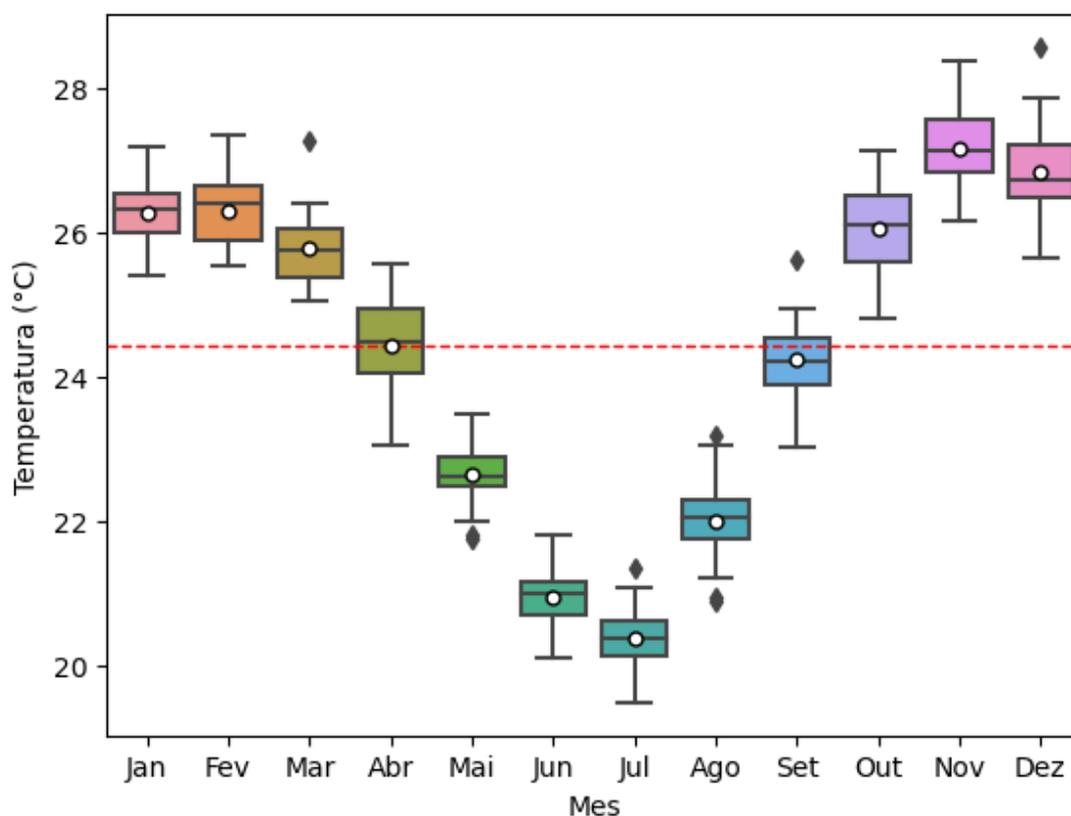


Figura 10: Diagrama de Tukey para a temperatura média mensal em Moçambique. Cada diagrama elementar, resulta da média mensal de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.

Esse padrão de diferença entre os meses com temperaturas acima e abaixo da média pode ser observado na Figura 11. A cor azul, representa as regiões com temperaturas mais baixas e a vermelho, regiões com temperaturas mais elevadas. Ainda na Figura 11, é possível observar regiões com temperaturas elevadas na maior parte dos meses, como o Norte do distrito de Mecula na província de Nissa, Moatize na província de Tete, Mabalane, Chicualacuala, e Sul dos distritos de Chigubo e Massangene na província de Gaza. As regiões com temperaturas menores na maioria dos meses, incluem distrito de Lichinga em Niassa, Malema em Nampula, Gurue em Zambezia, Angonia em Tete e, Sussundenga em Manica.

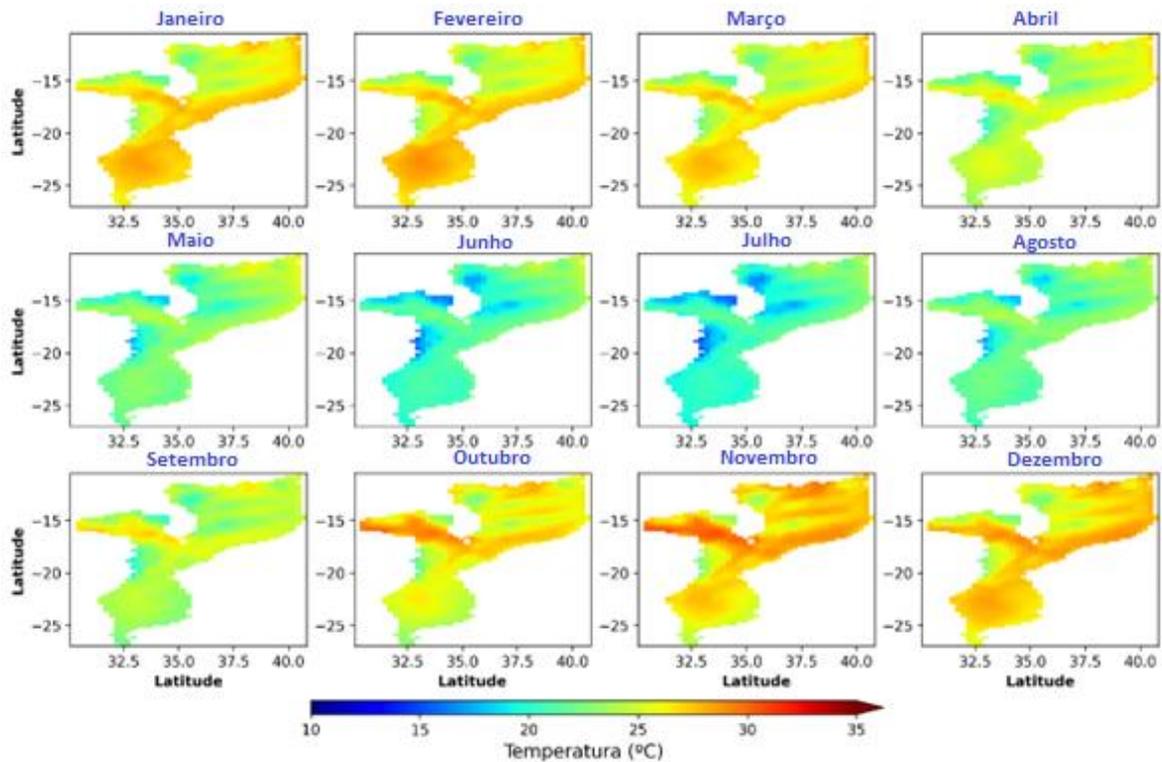


Figura 11: Mapa de distribuição espacial e temporal da temperatura mensal por pixel em Moçambique, observada (ERA 5) entre 2003 e 2022.

Na Figura 12, é apresentado a série da temperatura anual em Moçambique para o período de 2003 a 2022. A temperatura anual média é de 24,4 °C e o desvio-padrão da temperatura anual é de 0,25 °C. As temperaturas mínimas e máximas registadas foram de 24,1 °C em 2004 e 24,9 °C em 2016. Da Figura 12, ainda é possível observar sete eventos anómalos de temperatura durante o período de estudo, sendo quatro que representam anos quentes (2005, 2016, 2019 e 2020) e, três que representam anos frios (2004, 2013 e 2014) (Apêndice 5).

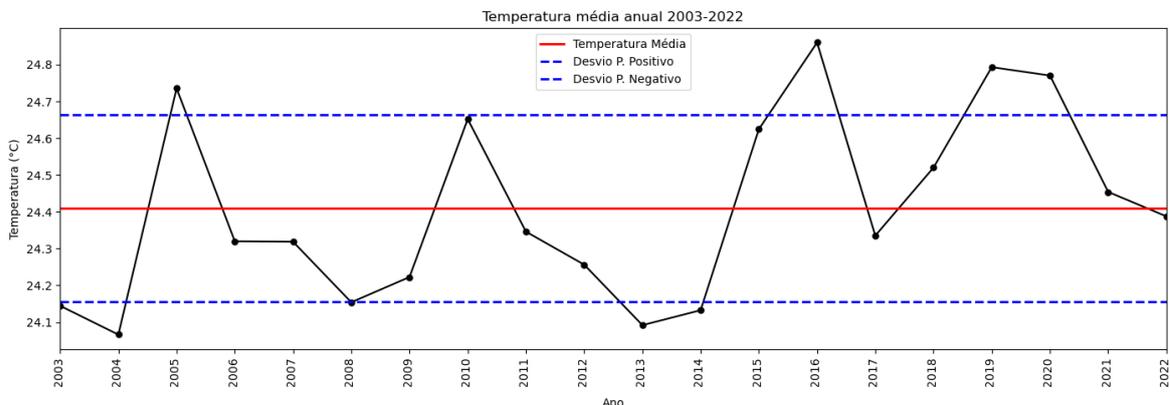


Figura 12: Variabilidade da temperatura em Moçambique entre 2003 a 2022. Cada valor da temperatura média anual, resulta da média de todos os pixéis de Moçambique de 2003 a 2022.

4.2 Variações simuladas do rendimento de grão e biomassa em função dos factores de experimento virtual

4.2.1 Rendimento potencial (Y0)

A Figura 13, mostra os rendimentos simulados médios interanuais (de 2003 a 2022) de biomassa e grão para uma selecção de 5 diferentes locais dando respostas contrastadas desses rendimentos aos factores de data de sementeira, variedade, cenários de simulação ou ao modelo utilizado entre CELSIUS, STICS ou DSSAT. Os resultados detalhados para todas os 15 locais podem ser encontrados no anexo (Apêndice 6).

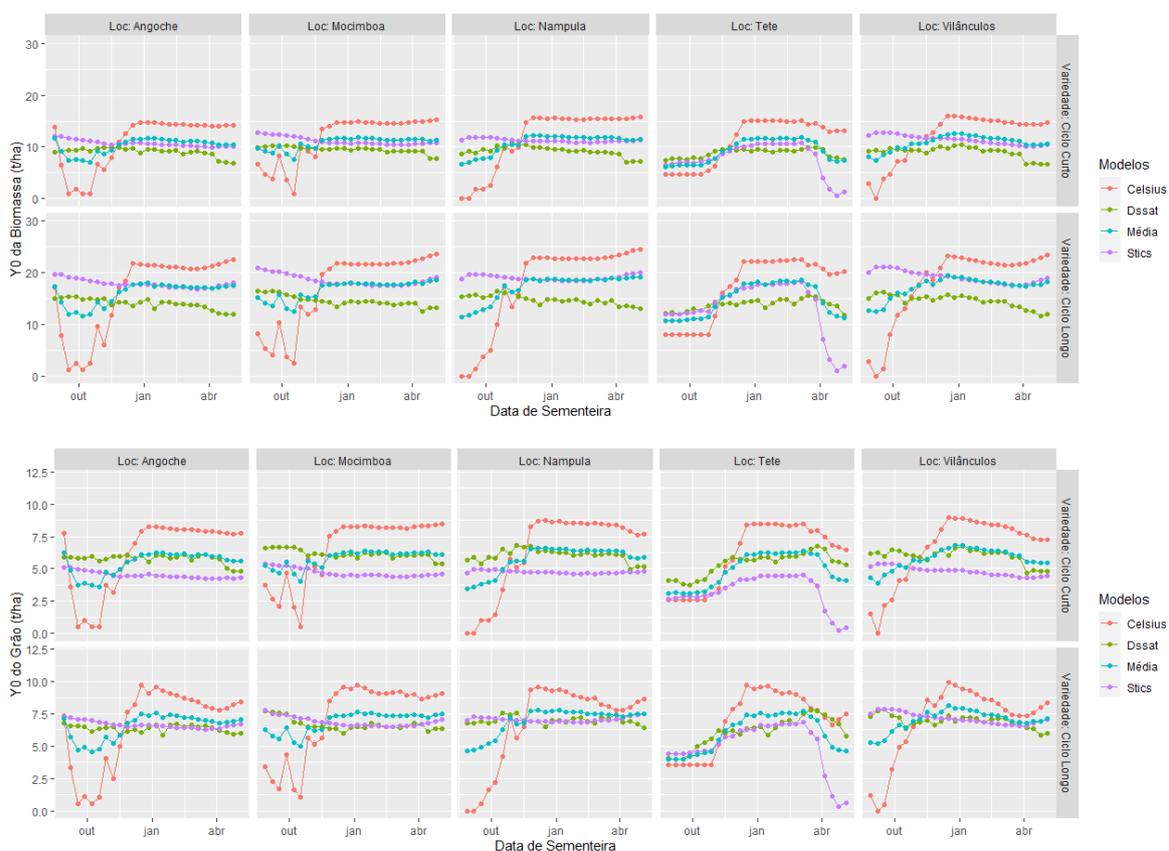


Figura 13: Variação do rendimento potencial da biomassa e do grão do milho em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 5 diferentes pontos dando respostas contrastantes em Moçambique.

Observa-se nessas figuras que o rendimento potencial de biomassa e do grão de milho, quando em média dos três modelos, varia entre $6,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $12,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, e entre $3,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $6,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente, em função da data de sementeira e do local no caso da variedade de ciclo curto, e entre $10,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $19,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, e entre $4,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $8,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ respetivamente, no caso da variedade de ciclo longo.

Observa-se que o modelo CELSIUS simula valores muito baixos para certas datas de sementeira. Foi verificado que isto resulta de uma parametrização de CELSIUS provocando a morte simulada da cultura quando o solo superficial for abaixo do ponto de murcha permanente por um determinado tempo, sem consistência com o facto de ter escolhido a opção de simular o rendimento potencial (então sem efeito do estresse hídrico no crescimento das plantas). Fora dessas datas, com as problemáticas de humidade no meio da época seca, CELSIUS simula os valores mais elevados de Y0 (biomassa e grão), relativamente aos outros dois modelos, com excepção apenas de algumas localidades (Chimoio, Lichinga e Sussundenga) onde estimativos de DSSAT para Y0 para o grão da variedade do ciclo longo (1.7) superam os do CELSIUS em algumas datas. No caso de Y0 para biomassa, o modelo DSSAT sempre simula os valores mais baixos e o STICS os valores intermediários entre CELSIUS e DSSAT e assim mais próximas a média dos três modelos. No caso de Y0 para grão, a posição relativa dos estimativos do STICS e de DSSAT varia bastante entre locais e segundo a variedade considerada, por exemplo com STICS simulando valores entre 0,3 e 4,5 t.ha⁻¹ para a variedade do ciclo curto em Tete onde DSSAT simula valores entre 3,8 e 6,7 t.ha⁻¹ enquanto em Vilanculos, Y0 simulado por CELSIUS e DSSAT no caso da variedade do ciclo longo são entre 0,0 e 9,9 t.ha⁻¹ e entre 5,8 e 7,9 t.ha⁻¹, respectivamente.

Os valores de Y0 foram assim sempre maiores para a variedade do ciclo longo comparado a variedade do ciclo curto, em qualquer um dos modelos. O tipo de variedade não teve influência nas diferenças entre modelos para simulação de biomassa, mas observa-se no caso de Y0 do grão uma interação entre a variedade e a amplitude dos modelos, bem como as oscilações (positivas ou negativas) das diferenças entre modelos.

4.2.2 Rendimento limitado pela água (Yw)

Na Figura 14, são apresentados os valores médios simulados do rendimento potencial da biomassa e grão limitado pela água para o intervalo de tempo definido no estudo para uma selecção de 5 locais dando respostas concordantes desses rendimentos aos factores de data de sementeira, variedade, cenários de simulação ou ao modelo utilizado entre CELSIUS, STICS ou DSSAT. Os resultados detalhados para todas as 15 locais podem ser encontrados no anexo (Apêndice 7).

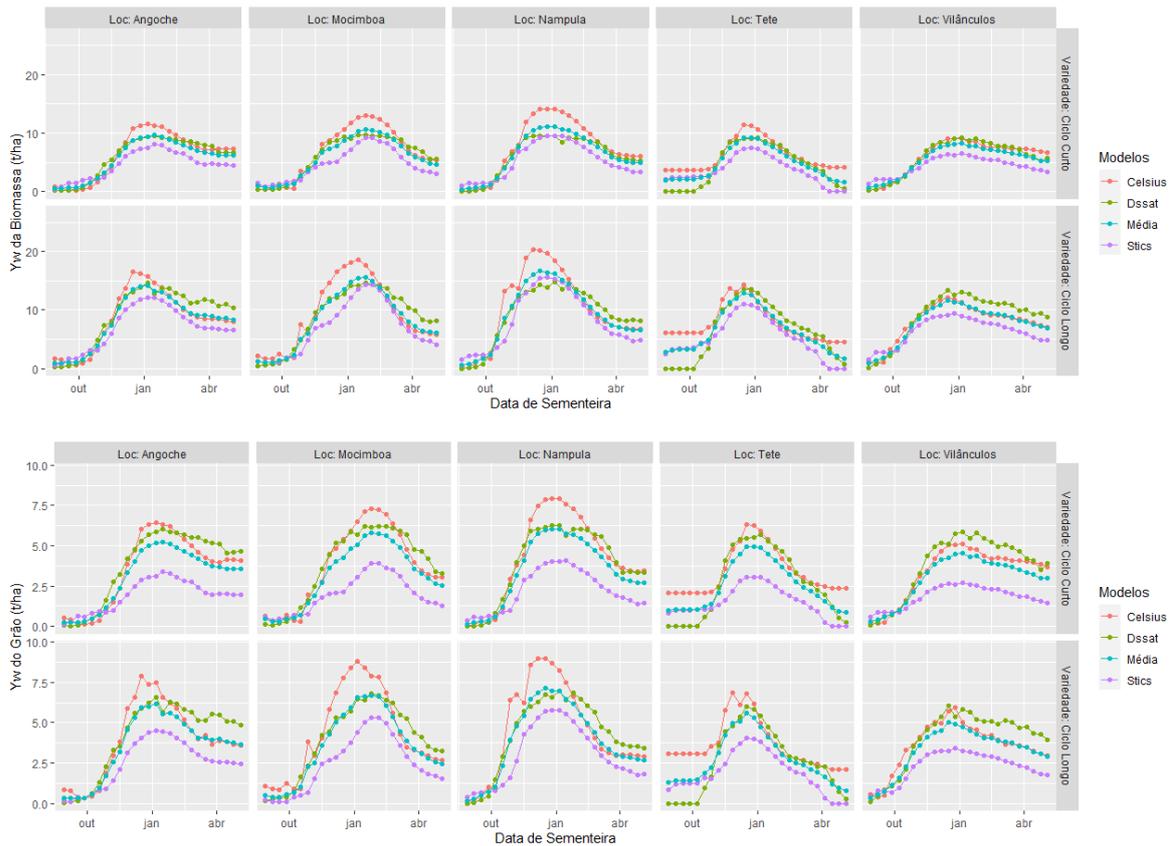


Figura 14: Variação do rendimento potencial da biomassa e do grão do milho limitado pela água em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 5 diferentes pontos dando respostas concordantes em Moçambique.

Na Figura 14, também é possível observar que o rendimento potencial de biomassa e do grão de milho limitado pela água, quando em média dos três modelos, varia entre $0,4 \text{ t.ha}^{-1}$ e $11,1 \text{ t.ha}^{-1}$, e entre $0,2 \text{ t.ha}^{-1}$ e $6,1 \text{ t.ha}^{-1}$, respectivamente, em função da data de sementeira e do local no caso da variedade de ciclo curto, e entre $0,6 \text{ t.ha}^{-1}$ e $16,7 \text{ t.ha}^{-1}$, e entre $0,2 \text{ t.ha}^{-1}$ e $7,1 \text{ t.ha}^{-1}$ respetivamente no caso da variedade do ciclo longo. Os valores de Y_w da biomassa da média dos três modelos foram sempre mais elevados para a variedade do ciclo longo do que para a variedade do ciclo curto em todos os locais, e quanto ao Y_w do grão, o mesmo se verifica para Quelimane, e apenas até os meados da época chuvosa para os restantes locais.

Verifica-se que o modelo STICS simula valores absolutos de Y_w (biomassa e grão) muito baixos para determinadas datas de sementeira em relação aos outros modelos, excepto para Lichinga onde o modelo DSSAT simula valores muito baixos. No caso do modelo CELSIUS, observa-se que em determinadas datas de sementeira ele simula valores absoluto maiores de Y_w do grão assim como da biomassa nas duas variedades na maior parte das datas de sementeira. Em algumas datas de sementeira, principalmente meados da época chuvosa e

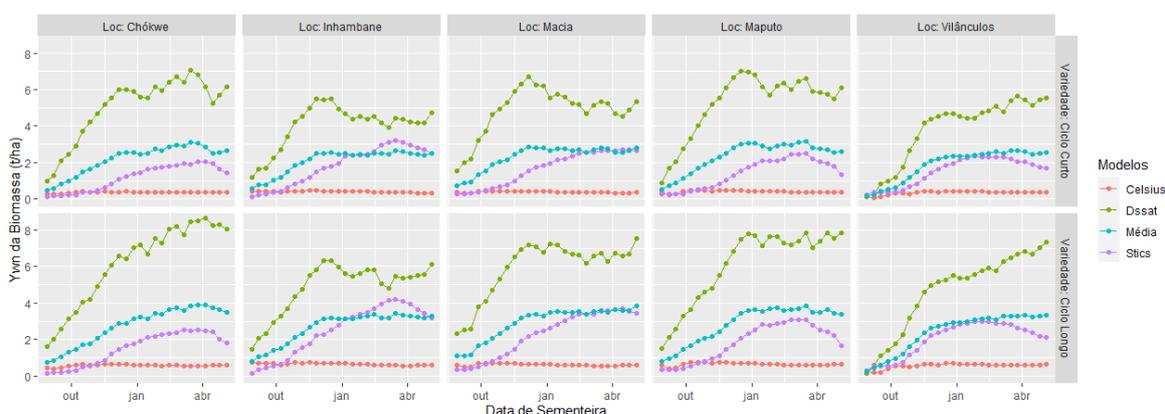
início da seca, o modelo DSSAT simula valores elevados de Y_w do grão e Y_w da biomassa em alguns locais (Angoche, Beira, Chókwè, Inhambane, Macia, Maputo, Nampula, Quelimane, Tete, Vilânculos) onde o modelo CELSIUS modelo simula valores intermédios entre DSSAT e STICS.

No caso de Y_w do grão, a posição relativa dos estimadores de STICS e DSSAT varia bastante em função do local e da variedade considerada, por exemplo com STICS simulando valores entre 0,4 e 3,9 t.ha⁻¹ para a variedade do ciclo curto em Mocimboa onde DSSAT simula valores entre 0,1 e 6,3 t.ha⁻¹ enquanto em Angoche, Y_w simulado por CELSIUS e DSSAT no caso da variedade do ciclo longo são entre 0,3 e 7,9 t.ha⁻¹ e entre 0,1 e 6,6 t.ha⁻¹, respectivamente.

Os valores de Y_w da média dos três modelos foram assim sempre maiores para a variedade do ciclo longo comparado a variedade do ciclo curto, em qualquer um dos modelos. O tipo de variedade não teve influência nas diferenças entre modelos para simulação de biomassa, mas observa se no caso de Y_w do grão uma interação entre a variedade e a amplitude dos modelos, bem como as oscilações (positivas ou negativas) das diferenças entre modelos.

4.2.3 Rendimento limitado pela água e nitrogénio (Y_{wn})

Quanto ao rendimento potencial da biomassa e grão limitado pela água e nitrogénio, a Figura 15 ilustra os seus valores médios absolutos simulados (de 2003 a 2024) para uma selecção de 5 locais da zona sul do país dando respostas contrastantes desses rendimentos aos factores de data de sementeira, variedade, cenário de simulação ou modelos utilizados entre CELSIUS, STICS ou DSSAT. Os resultados detalhados para todos os 15 locais, são fornecidos no anexo (Apêndice 8).



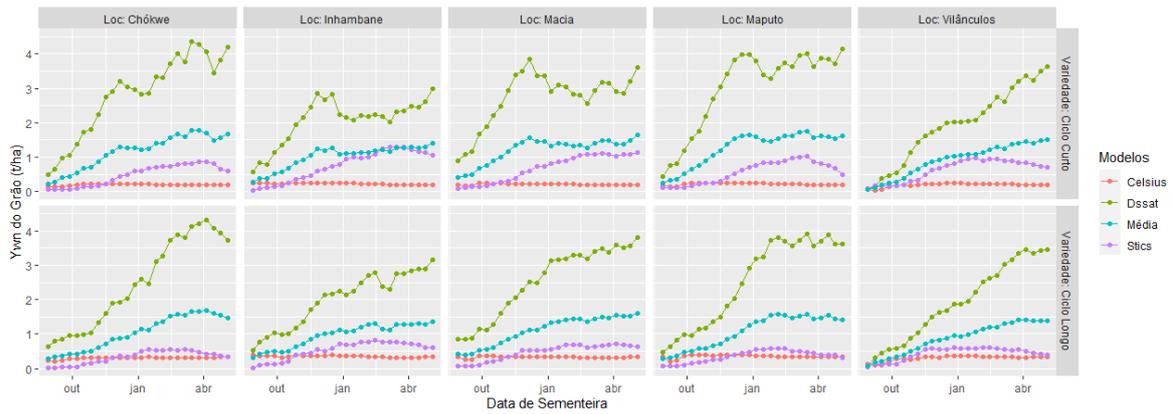


Figura 15: Variação do rendimento potencial do grão e biomassa limitado pela água e nitrogénio em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 5 diferentes pontos dando respostas contrastantes em Moçambique.

O rendimento potencial de biomassa e do grão de milho limitado pela água e nitrogénio, quando em média dos três modelos, varia entre $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ e $3,2 \text{ t.ha}^{-1}$, e entre $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ e $1,79 \text{ t.ha}^{-1}$, respectivamente, em função da data de sementeira e do local no caso da variedade do ciclo curto, e entre $0,2 \text{ t.ha}^{-1}$ e $3,9 \text{ t.ha}^{-1}$, e entre $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ e $1,69 \text{ t.ha}^{-1}$ respetivamente no caso da variedade do ciclo longo.

Observa-se que o modelo STICS simula valores absolutos de Ywn (biomassa e grão) muito baixos para certas datas de sementeira que coincidem com a época seca. Fora dessas datas, com humidade na época chuvosa, o modelo CELSIUS simula valores mais baixos em relação aos outros modelos. Verifica-se que o modelo DSSAT simula valores elevados de Yw de biomassa e grão, excepto para alguns locais (Angoche, Beira, Chimoio, Cuamba, Lichinga, Nampula, Quelimane e Sussundenga) onde os estimativos de STICS superam de DSSAT em algumas datas de sementeira que coincidem com a época do ano com maior observação da precipitação. No caso de Ywn para grão, a posição relativa dos estimativos do STICS e de DSSAT variam bastante entre locais e segundo a variedade considerada, a título de exemplo com o STICS simulando valores entre $0,1$ e $0,9 \text{ t.ha}^{-1}$ para a variedade do ciclo curto em Chókwe onde DSSAT simula valores entre $0,5$ e $4,4 \text{ t.ha}^{-1}$ enquanto em Inhambane, Ywn simulado por CELSIUS e DSSAT no caso da variedade do ciclo longo são entre $0,3$ e $0,4 \text{ t.ha}^{-1}$ e entre $0,5$ e $3,2 \text{ t.ha}^{-1}$, respectivamente.

4.2.4. Valor médios dos três modelos, para Y0, Yw e Ywn

A Figura 16, representa a variação interanuais do rendimento da biomassa e grão em função da data de sementeira, cenário de simulação e tipo de variedade para 5 locais diferentes dando respostas concordantes. Os resultados detalhados para todos os 15 locais, são fornecidos no anexo (Apêndice 9).

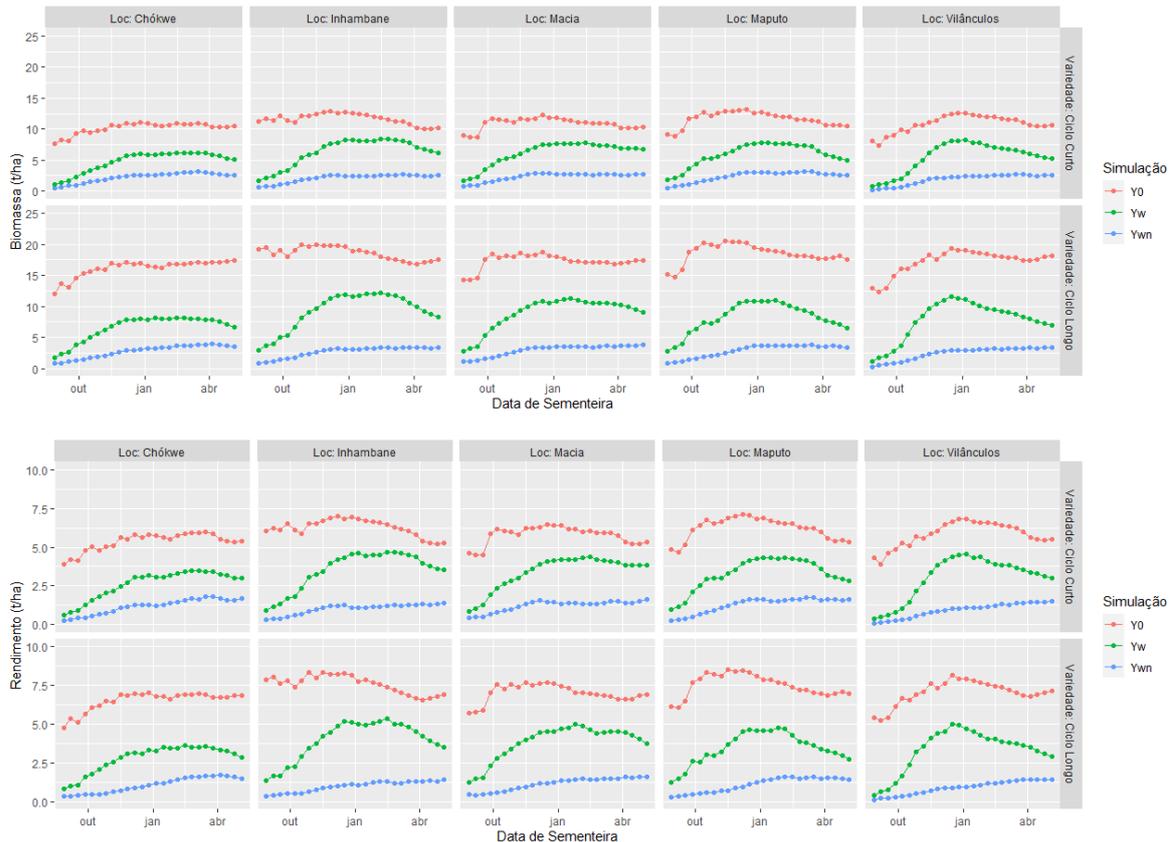


Figura 16: Variação do rendimento médio da biomassa e grão de milho em função da data de sementeira para diferentes cenários de simulação (Y0, Yw e Ywn) de 5 diferentes pontos dando respostas concordantes em Moçambique.

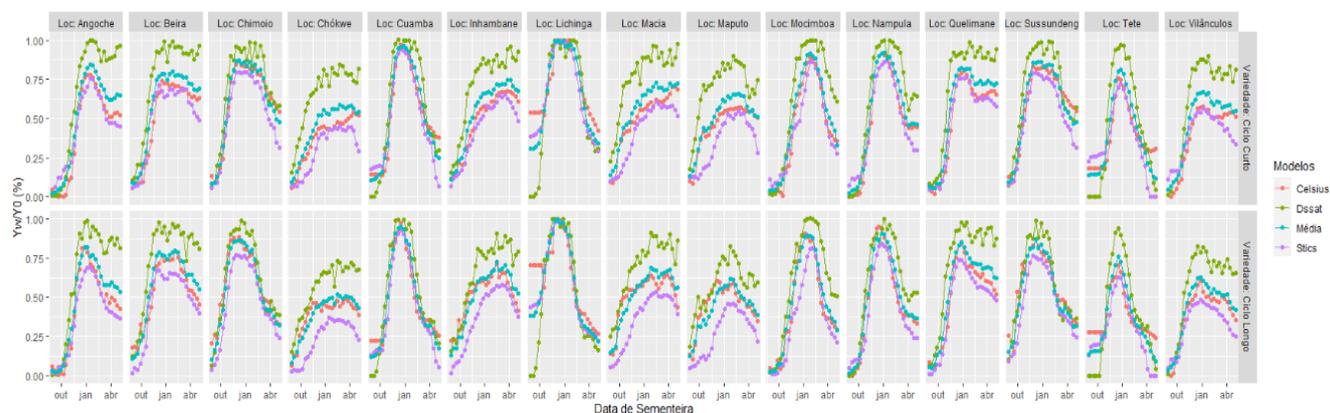
Observa-se que o Y0 é sempre mais elevado do que o Yw e Ywn, e muito menos dependente da data de sementeira do que o Yw, mais um pouco mais dependente da data de sementeira do que Ywn (na maioria dos locais). O Ywn é sempre muito mais baixo do que o Y0 e Yw e muito menos dependente de data de sementeira do que o Yw. Os valores de Y0, Yw e Ywn foram sempre maiores para a variedade do ciclo longo comparado a variedade do ciclo curto, tanto para biomassa assim como para o grão. É notório que a variação do rendimento do grão nas três condições de simulação é maior em relação ao rendimento da biomassa tanto para a variedade do ciclo curto assim como do ciclo longo.

Pode-se observar que a curva do Y_w é bem definida, o que indica a sua maior dependência em relação à data de sementeira e atinge o seu máximo no início da época seca, em relação as outras duas opções de simulação. Os valores mínimos e máximos simulados do Y_0 do grão para uma média de três modelos (STICS, DSSAT e CELSIUS) é de $3,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para Tete e $7,5 \text{ t.ha}^{-1}$ para Sussundenga, no caso do Y_w foi de $0,2 \text{ t.ha}^{-1}$ para Nampula e $7,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, e para o Y_{wn} foi de $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para Nampula e $0,4 \text{ t.ha}^{-1}$ para Macia, respectivamente para a variedade do ciclo curto. No caso da variedade do ciclo longo, os valores mínimos e máximos simulados do Y_0 do grão para a média dos três modelos foram de $3,99 \text{ t.ha}^{-1}$ para Tete e $9,4 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, no caso do Y_w foi de $0,2 \text{ t.ha}^{-1}$ para Nampula e $8,8 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, e quanto ao Y_{wn} foi de $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para Nampula e $1,7 \text{ t.ha}^{-1}$ para Chókwè, respectivamente.

Para o caso do Y_0 da biomassa, os valores mínimos e máximos da média dos três modelos são $6,2 \text{ t.ha}^{-1}$ para e Tete e $14,9 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, quanto ao Y_w é de $0,4 \text{ t.ha}^{-1}$ para e Nampula e $13,8 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, e para o Y_{wn} é de $0,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para e Nampula e $3,3 \text{ t.ha}^{-1}$ para Mocimboa, respectivamente para a variedade do ciclo curto. Para o caso da variedade do ciclo longo, os valores para Y_0 são de $10,7 \text{ t.ha}^{-1}$ para e Tete e $24,6 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, quanto ao Y_w é de $0,7 \text{ t.ha}^{-1}$ para e Nampula e $22,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para Lichinga, e para Y_{wn} é de $0,2 \text{ t.ha}^{-1}$ para e Nampula e $4,1 \text{ t.ha}^{-1}$ para Mocimboa, respectivamente.

4.3 Rendimento relativo

A Figura 17, ilustra a variação interanual do rendimento relativo do grão limitado pela água (Y_w/Y_0) e limitado pelo água e nitrogénio (Y_{wn}/Y_0) em função da data de sementeira, modelos e tipo de variedade para 15 locais.



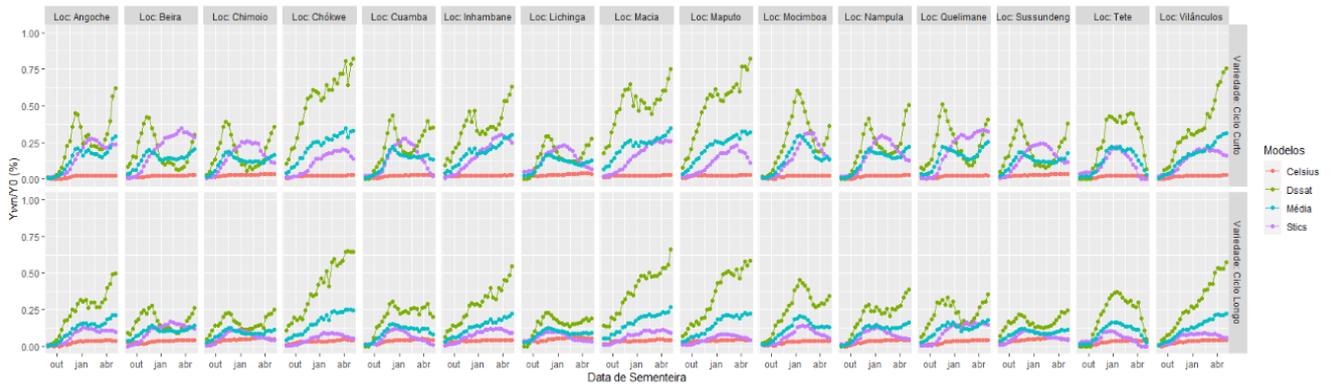


Figura 17: Variação do rendimento relativo do grão do milho limitado pela água (Y_w/Y_0) e limitado pela água e nitrogénio (Y_{wn}/Y_0) em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.

Podemos observar na Figura 17 que existe muito menos diferenças entre modelos quando se considera os rendimentos relativos Y_w/Y_0 e Y_{wn}/Y_0 (comparativamente a variações entre modelos para Y_0 , Y_w e Y_{wn}) (ver Apêndice 5). O que permite a identificação de janelas de sementeira se baseando nestes rendimentos relativos (datas para as quais Y_w/Y_0 é maior ou igual a 70% do máximo da data de sementeira de Y_w/Y_0 , e Y_{wn}/Y_0 é maior ou igual a 70% do máximo da data de sementeira Y_{wn}/Y_0).

4.4 Identificação do intervalo de sementeira com menor risco

O intervalo de sementeira varia bastante entre os locais, cenários de simulação, variedade e modelos com um mínimo e máximo de 30 e 220 dias, respectivamente (Figura 18). Para um cenário com Y_w , Tete apresenta intervalo de sementeira mais baixo de 50 dias para o modelo de simulação CELSIUS, ao passo que Macia e Maputo para o modelo DSSAT, e Maputo para o modelo CELSIUS apresentam maior intervalo de sementeira de 200 dias, para a variedade do ciclo curto. No caso da variedade do ciclo longo, Tete apresenta um intervalo menor para o modelo CELSIUS e STICS de 50 dias, ao passo que Chókwe e Macia apresentam maior intervalo de 200 dias, para o modelo CELSIUS.

No caso do Y_{wn} , Vilânculos apresenta intervalo de sementeira mais baixo de 40 dias para o modelo de simulação DSSAT, ao passo que Inhambane, Macia e Maputo apresentam maior intervalo de sementeira de 220, para o modelo CELSIUS para a variedade do ciclo curto. E para uma variedade do ciclo longo, Angoche apresenta menor intervalo de sementeira de 30 dias simulando com o modelo DSSAT, e Macia e Maputo apresentam maior intervalo de 210 dias para o modelo CELSIUS.

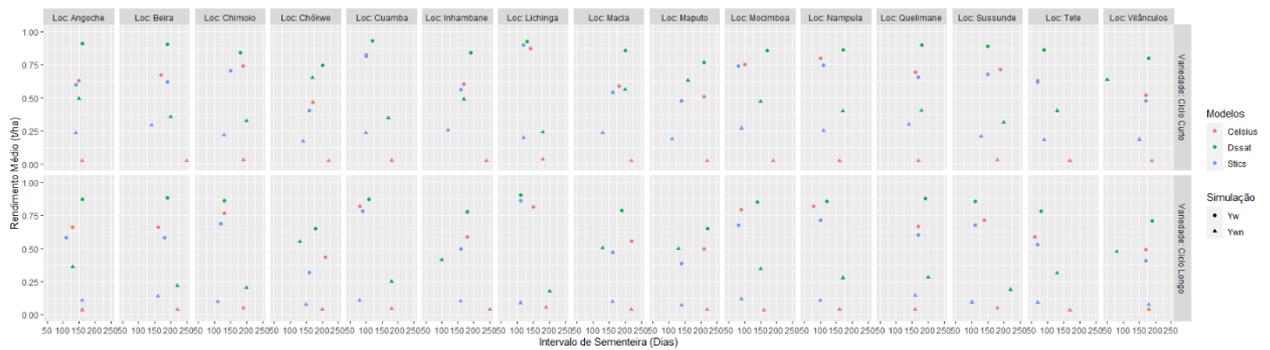


Figura 18: Intervalos de datas de sementeira com a probabilidade igual ou maior que 70% do máximo do Ywrel e Ywnrel, em função dos modelos, cenários de simulação (Yw e Ywn), variedades em estudo de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.

Os intervalos de sementeira em função do modelo, cenário de simulação e variedade usada são apresentados na Figura 19. Os intervalos foram obtidos considerando as datas de sementeira com uma probabilidade igual ou maior que 70% de sucesso em relação ao Y0. Cada barra, representa o intervalo de sementeira, sendo a barra a cor azul para o Ywn e cor a coral claro Yw e as linhas verticais a preto o intervalo de confiança a 95%.

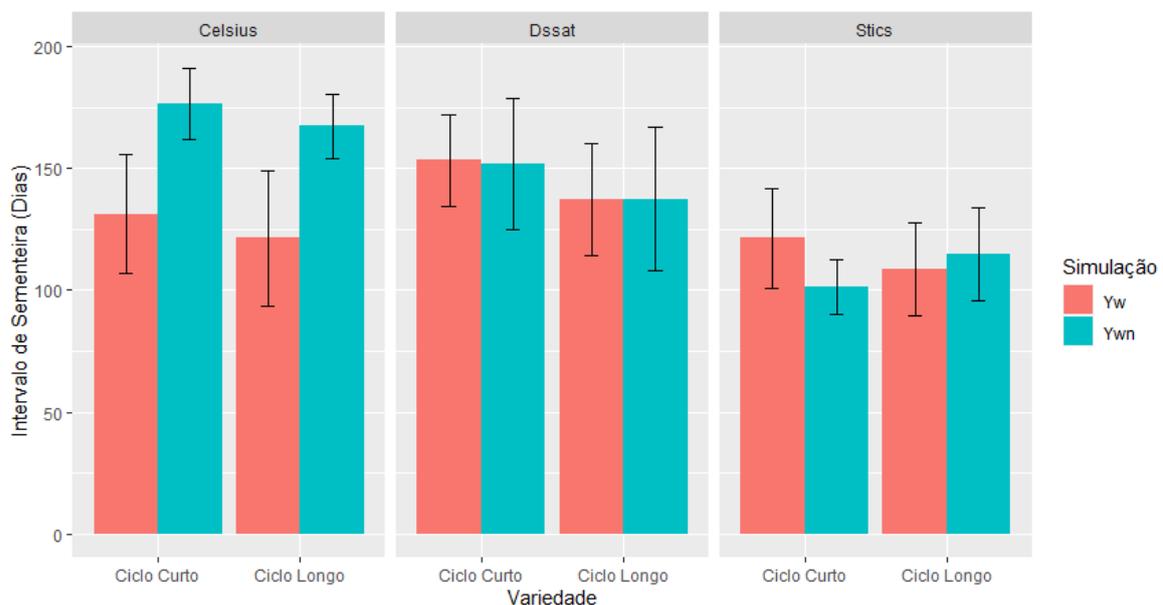


Figura 19: Intervalo de sementeira em função da variedade, modelos usados e cenário de simulação para uma média de 15 pontos seleccionados em Moçambique.

Observa-se na Figura 19, que o intervalo de sementeira em cada modelo varia em função da variedade e do cenário de simulação. A 95% de nível de confiança, o modelo CELSIUS apresenta maior variação dos intervalos de sementeira quando comparado entre os cenários de simulação e variedades usadas. Ao passo que o modelo DSSAT apresenta menor variação

do intervalo de sementeira apenas quando comparado entre os cenários de simulação e o modelo STICS, quando comparado entre as variedades. Estas diferenças, podem ser atribuídas a parametrização dos modelos de tal forma que introduzem um nível de incerteza nos resultados ao expor a diferentes condições de simulação e variedade.

Para o Ywn, o modelo CELSIUS apresenta maior intervalo de sementeira, seguido do modelo DSSAT e em último o modelo STICS. No caso do Yw, o modelo DSSAT apresenta maior intervalo de sementeira e o modelo STICS menor, e CELSIUS intermediário. Quanto as variedades, a variedade do ciclo curto apresenta maior intervalo de sementeira em relação a variedade do ciclo longo.

5. DISCUSSÃO

O risco climático é muito maior em caso de cultivo em condição de alta disponibilidade de nitrogénio do que em condições de limitações forte de disponibilidade de nitrogênio. Resultados similares foram alcançados por Falconnier et al., (2020). Adicionalmente, estes autores afirmam que a necessária intensificação sustentável dos sistemas de cultivo na África Subariana (ASS), tornar-se-á cada vez mais arriscada à medida que as mudanças climáticas agravarem, o que realça a necessidade de intervenções políticas destinadas a implementar mecanismos de resposta aos riscos.

No que diz respeito a janela óptima de sementeira, foi diferente nos 15 pontos seleccionados, devido a variação das condições climáticas. Em todas as datas de sementeira durante todo o ano (Apêndice 5), a simulação da biomassa e grão foram sempre maiores no verão em relação inverno, ao passo que Abbas et al., (2023), no seu estudo conduzindo no Pakistan, aplicando o modelo CERES-maize, obtiveram maiores rendimentos de grão de milho na primavera (que vai de 15 de Janeiro a 5 de Março).

Existem locais onde a data de sementeira é um factor essencial do risco, qualquer que seja o nível de limitação de disponibilidade de nitrogénio, com intervalo de sementeira de menor risco limitada a menos de um mês (exemplo: Mocimboa).

Verifica-se também localidades onde o intervalo de data de sementeira de menor risco depende fortemente do nível da limitação de disponibilidade de nitrogénio (Cuamba e Nampula), o intervalo de data de sementeira sendo muito mais ampla em situação de baixa fertilidade ou extensiva do que em situação mais fértil ou intensiva.

E existem localidade com ampla janela de menor risco qualquer que seja o nível da limitação de disponibilidade de nitrogénio (exemplo: Maputo, Chókwè e Macia).

As recomendações de data de sementeira de milho em sequeiro em Moçambique são geralmente baseadas em informações locais (IIAM, 2012; J. Ribeiro, 2008). A recomendação da data de sementeira disponibilizada pelos investigadores geralmente é feita a partir de extensas experiências de campo realizados localmente. Geralmente, sugere-se uma janela de data de sementeira semelhante para vários anos, bem como para cada local sem considerar as variações temporais e espaciais (Abbas et al., 2023; Adnan et al., 2019; Bao et al., 2017; Li et al., 2015).

Existem diferenças importantes entre modelos, mesmo quando considerado os rendimentos relativos (Y_w/Y_0 e Y_{wn}/Y_0), e interações importantes entre as diferenças entre modelos e os factores do experimento virtual, o que limita fortemente o valor do estudo para recomendações directas em termos de data de sementeira e variedade por local, e torna necessário um trabalho de calibração dos modelos usando dados medidos de biomassa e grão etc, para poder atingir resultados mais específicas do que os resultados acima.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Em geral, os resultados obtidos das análises de classificação de tendências realizadas dos dados históricos de precipitação e temperatura foi observado uma variabilidade interanual do clima ao longo dos 20 anos de registo. Entre os anos, classificou-se o ano de 2022 como mais húmido e, o de 2005 como o mais seco, e 2016 como o ano mais quente e o mais frio 2004. Entre 2003 e 2016 houve uma tendência de redução da precipitação média anual em Moçambique, onde depois passou-se a observar um incremento da precipitação até 2022. No caso da temperatura média anual, observou-se um incremento de 2003 a 2022.

Para as condições de Moçambique, o rendimento do milho simulado pelos três modelos varia em função da localização. Os modelos de cultivo usados apresentam grande variação na estimativa do rendimento do milho, indicando a necessidade da sua calibração para as condições específicas de Moçambique. A simulação de Y_w e Y_w/Y_0 mostra que esses parâmetros podem ser usados na tomada de decisões relacionados à gestão agrícola e a previsão da produtividade.

O risco entre os agricultores não se manifesta da mesma forma, e o principal factor que influencia essas incertezas é a variabilidade interanual do clima. A estimativa do intervalo de sementeira varia significativamente entre os modelos de cultivos, indicando que esses intervalos não devem ser usados para recomendações quaisquer, o que também propõe a calibração dos modelos.

6.2 Recomendações

Recomenda-se aos investigadores a:

- A calibração dos modelos para as condições de Moçambique;
- A conduzir o experimento tomando em conta a realidade das características dos solos de Moçambique;
- A conduzir o experimento tomado em conta as variedades de milho cultivadas em Moçambique;
- A fazer uma análise multicritério combinando, a radiação solar, variedades e o risco de perda de rendimento.

7. REFERÊNCIAS

- Abbas, G., Rehman, A. U., Sarwar, N., Fatima, Z., Hussain, S., Ahmed, M., Raza, M. A., Kan, M., Doğan, H., Khan, M. A., & Ahmad, S. (2023a). Deciding sowing-window for maize-based cropping system in arid and semiarid environments in Punjab, Pakistan. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(6), 1078–1098. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3149>
- Abbas, G., Rehman, A. U., Sarwar, N., Fatima, Z., Hussain, S., Ahmed, M., Raza, M. A., Kan, M., Doğan, H., Khan, M. A., & Ahmad, S. (2023b). Deciding sowing-window for maize-based cropping system in arid and semiarid environments in Punjab, Pakistan. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(6), 1078–1098. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3149>
- Adnan, A. A., Diels, J., Jibrin, J. M., Kamara, A. Y., Craufurd, P., Shaibu, A. S., Mohammed, I. B., & Tonnang, Z. E. H. (2019). Options for calibrating CERES-maize genotype specific parameters under data-scarce environments. *PLoS ONE*, 14(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200118>
- ARISE. (2020). *Deliverable Proof-Demonstration site equipped, or prototype developed, EIT-BP2020*.
- Bao, Y., Hoogenboom, G., McClendon, R., & Vellidis, G. (2017). A comparison of the performance of the CSM-CERES-Maize and EPIC models using maize variety trial data. *Agricultural Systems*, 150, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.006>
- Beherea, S. K., & Yamagata, T. (2001). Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 28(2), 327–330. <https://doi.org/10.1029/2000GL011451>
- Berlato, M. A., Da Cunha, G. R., & Fontana, D. C. (2024). *El Niño Oscilação Sul: Clima - Vegetação - Agricultura* (G. R. Da Cunha, Ed.; 1a Edição). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1164333>
- Coelho, M. A., Tibério, F., Martins Da Silva, S., Boffino, J. E., & Monteiro, A. (2021). *Riscos climáticos*. https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/226951/1/livro_RecomendacaoCalagemAdubacao-AnaLuciaBorges-AINFO.pdf

- Costa, J., Pereira, G., Siqueira, M. E., Cardozo, F., & Silva, V. V. da. (2019). Validação dos Dados de Precipitação Estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Ano 15, 24*, 228–243.
- Davis, C. (2011). *Risco Climático e Vulnerabilidade: Manual Para a África Austral*. https://kulima.com/wp-content/uploads/2017/05/SADC-Portuguese-Handbook-2013_PORT.pdf
- De Souza, C. A., & Reboita, M. S. (2021). Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. *Terrae Didatica*, 17(e021009), 1–13. <https://doi.org/10.20396/td.v17i0.8663474>
- Degola, T. S. D. (2013). *Impactos e Variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Sobre o Brasil no Clima Presente e em Cenários Futuros*.
- Deixa, S. V. (2014). *Avaliação do Rendimento e datas ótimas de sementeira da Cultura de Milho em Sequeiro Usando o Modelo APSIM*.
- Dias, H. B. (2016). *Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil*.
- Dos Muchangos, A. (1999). *Moçambique Paisagens e Regiões Naturais*.
- Dos Santos Junior, E. P., Blain, G. C., & Xavier, A. C. F. (2022). On The Suitability of Data From The Climatic Research Unit (CRU) and 5th Generation of European Reanalysis (ERA5) For Monitoring Drought Events Under a Probabilistic Framework. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(2), 243–260. <https://doi.org/10.1590/0102-77863720019>
- ESRI. (2021). *What is netCDF data?* ESRI. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/netcdf/what-is-netcdf-data.htm>
- Evans, L. T., & Fischer, R. A. (1999). *Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance*.
- Falconnier, G. N., Corbeels, M., Boote, K. J., Affholder, F., Adam, M., MacCarthy, D. S., Ruane, A. C., Nendel, C., Whitbread, A. M., Justes, É., Ahuja, L. R., Akinseye, F. M., Alou, I. N., Amouzou, K. A., Anapalli, S. S., Baron, C., Basso, B., Baudron, F., Bertuzzi, P., ... Webber, H. (2020). Modelling climate change impacts on maize yields

- under low nitrogen input conditions in sub-Saharan Africa. *Global Change Biology*, 26(10), 5942–5964. <https://doi.org/10.1111/gcb.15261>
- FAO, & DWFI. (2015). *Yield gap analysis of field crops : methods and case studies* (FAO Water Reports, Ed.). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bd44e093-8f41-4b99-875a-1387a1b1dd8d/content>
- Freitas, M. A. de S. (2005). Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi- áridas. *Revista Tecnologia*, 19, 19–30. <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/1175>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gershenfeld, N. (1999). *The Nature of Mathematical Modeling* (1st ed.). Cambridge University Press.
- Giner, M., Affholder, F., Chimonyo, V. G. P., Falconnier, G., Leroux, L., Auzoux, S., ADAM, M., & Kouakou, P. (2024). ACME (Agile Crop Model Ensemble): a package to generate and run large virtual experiments with ensembles of crop simulation models. *SSRN*, 0–11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4728153>
- Giner, M., Affholder, F., Falconnier, G. N., Chimonyo, V. G. P., Leroux, L., Auzoux, S., ADAM, M., Kouakou, P., Loison, R., Midingoyi, C. A., & Chavez, E. (2024). ACME (Agile Crop Model Ensemble): A package to generate and run large virtual experiments with ensembles of crop simulation models. *SoftwareX*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101777>
- GISGeography, B. (2019). *The Ultimate List of GIS Formats and Geospatial File Extensions* gisgeography.com/gis-formats *GIS formats-Pick your poison*.
- Greigh De Brito, G. (2009). *Agrometeorologia dos cultivos*. <https://www.researchgate.net/publication/320774657>
- Haefner, J. W. (2005). *Modeling Biological Systems: Principles and Applications* (Utah State University, Ed.; 2nd ed.). Springer.

- Hoguane, A. M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 7(1), 69–82. https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci7_8_Hoguane.pdf
- Hornberger, G. M., & Spear, R. C. (1981). *Approach to the preliminary analysis of environmental systems*. *Journal of Environmental Management*. <https://www.osti.gov/biblio/6396608>
- IIAM. (2012). *Rentabilidade da cultura do milho na zona sul de Moçambique: Estudo de caso do distrito de Boane*.
- INAM. (2023). *Relatório do Estado do Clima de Moçambique em 2023*. <http://www.inam.gov.mz>
- Kasampalis, D. A., Alexandridis, T. K., Deva, C., Challinor, A., Moshou, D., & Zalidis, G. (2018). Contribution of remote sensing on crop models: A review. In *Journal of Imaging* (Vol. 4, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jimaging4040052>
- Kruft, D. (2001). *Agricultural Zoning*. https://pennstatelaw.psu.edu/_file/aglaw/Agricultural_Zoning.pdf
- Kumar, P., Hamlington, B., Cheon, S. H., Han, W., & Thompson, P. (2020). 20th Century Multivariate Indian Ocean Regional Sea Level Reconstruction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(10). <https://doi.org/10.1029/2020JC016270>
- Li, Z. T., Yang, J. Y., Drury, C. F., & Hoogenboom, G. (2015). Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China. *Agricultural Systems*, 135, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.12.006>
- Luis, A., Ciro, R., De Souza, A., Daniel, M., Ituassú, R., Soler, E., Hoogerheide, S., Ikeda, F. S., Fernandes, F., Gabriel, J., Faria, R., Isernhagen, I., Gonçalves, L., Marina, V., Morales, M., & Carnevalli, R. A. (n.d.). *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agrossilvipastoril Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Embrapa Agrossilvipastoril Primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma Agropecuária Sustentável*. www.embrapa.br/fale-conosco/sac
- Mabilana, H. A., Fontana, D. C., & da Fonseca, E. L. (2012). Development of an agrometeorological spectral model to estimate maize yields: In the Manica Province-

- Mozambique. *Revista Ceres*, 59(3), 337–349. <https://doi.org/10.1590/s0034-737x2012000300007>
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1972). Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period. *J. Atmos. Sci.*, 29(6), 1109–1123. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<1109:DOGS CC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGS CC>2.0.CO;2)
- MADER. (2023). *Plano Estratégico para o Desenvolvimento do Sector Agrário - PEDSA 2030*.
- Magaia, E. (2017). *Technologies for improved water use efficiency in small-scale maize production in a semi-arid region*.
- Marassiro, M. J., Oliveira, M. L. R. de, & Pereira, G. da P. (2021). Agricultura familiar em Moçambique: Características e desafios. *Research, Society and Development*, 10(6), e22110615682. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15682>
- Maroneze, M. M., Zepka, L. Q., Vieira, J. G., Queiroz, M. I., & Jacob-Lopes, E. (2014). A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente e Água*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Martins, A. da C. (2022). *Fatores Climáticos e Sistemas Meteorológicos que Atuam Sobre O Brasil – Uma Revisão Bibliográfica*.
- Mazive, D. P., Tamele, B. Z. S., & Quissico, D. Z. (2018). *Influência do El Niño na Produção Agrária na Província de Gaza -Moçambique*. https://www.academia.edu/38026221/Influ%C3%Aancia_do_El_Ni%C3%B1o_na_Produ%C3%A7%C3%A3o_Agr%C3%A1ria_na_Prov%C3%ADncia_de_Gaza_Mo%C3%A7ambique_1
- McClain, B. P. (2023). *Python for Geospatial Data Analysis: Theory, Tools, and Practice for Location Intelligence* (M. Smith, Ed.; 1st ed.). O'Reilly.
- Medeiros, R. M., Brito, J. I. B. de, Silva, V. M. de A., Melo, V. da S., & Costa Neto, F. de A. da. (2016). El Niño/La Niña e sua influência no número de dias com chuva em Bom Jesus – Piauí, Brasil. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 11(2), 16–23. <https://doi.org/10.18378/rvads.v11i2.3993>
- Mendonça, F., & Danni-Oliveira, I. M. (2007). *Climatologia: Noções Básicas e Climas do Brasil* (A. P. Ribeiro, Ed.; Oficina de Texto).

- Miller, A. A. (1975). *Climatología* (OMEGA, Ed.; Cuarta Edición).
- MINED. (1986). *Atlas Geográfico* (L. P. Peter, Ed.; 2a Edição, Vol. 1).
- Mitidieri, F. J., & Xavier De Medeiros, J. (2008). *Zoneamento Agrícola de Risco Climático Ferramenta de auxílio ao seguro rural*.
- Monteiro, J. E. B. de A. (2020). *Zoneamentos de Uso Agrícola*.
- Monteith, J. L. (1996). The Quest for Balance in Crop Modeling. *Agron. J.*, 88, 695–697.
- Neto, D., P, S. L., & G, R. A. (2005). *Modelos Matemáticos-Fisiológicos Para Estimar Matéria Seca da Parte Aérea e Produtividade de Grãos de Milho Mathematical And Physiological Models For Plant Dry Matter And Productivity Estimation In Maize* (Vol. 4, Issue 11).
- Ngolo, A. O. (2014). *Zoneamento Agroclimático para Cultura do Café em Angola*. <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/6676/1/texto%20completo.pdf>
- Nimer, E. (1989). *Climatologia do Brasil* (IBGE, Ed.; 2º Edição).
- Oliveira, A. L. R., Moraes, S. R. P., Oliveira, K. P., Mendanha, J. S., & Rodrigues, J. da S. (2012). Zoneamento edafoclimático da cultura do mamão. *Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer*, 14, 956. <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/agrarias/zoneamento%20edafoclimatico%20da.pdf>
- Ometto, J. C. (1981). *Bioclimatologia Vegetal* (CERES XXY).
- Pasley, H., Brown, H., Holzworth, D., Whish, J., Bell, L., & Huth, N. (2023). How to build a crop model. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 43, Issue 1). Springer-Verlag Italia s.r.l. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00854-9>
- Pereira, A. R., Angelocci, L. R., & Sentelhas, P. C. (2002). *Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas* (Livraria e Editora Agropecuaria Ltda, Ed.; I). <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-sao-carlos/climatologia/pereira-et-al-2002-agrometeorologia-fundamentos-e-aplicacoes-praticas-ocr/37725271>
- Radha, V., & Murthy, K. (n.d.). *Crop Growth Modeling And Its Applications In Agricultural Meteorology*.

- Recha, J. W., & Chiulele, R. M. (2017). *Directriz para Agricultura Inteligente face ao Clima CSA (sigla em inglês) em Moçambique República de Moçambique*. <http://vuna-africa.com/>.
- Ribeiro, J. (2008). *Colecção de Habilidades para Vida: Calendário Agrícola, Fertilizantes e Adubos* (Porto Editora, Ed.).
- Sciolla, S., & Borda, S. (2018). *Data Curation Format Profile: netCDF*. <https://doi.org/10.7302/Z24Q7S64>
- Sediyama, G. C., Ferreira De Melo Junior, J. C., Rosa, A., Santos, D., Ribeiro, A., Heil Costa, M., Hamakawa, P. J., Nogueira Da Costa, J. M., & Cláudio Costa, L. (2001). Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais Climatological zoning for arabic coffee (*Coffea arabica* L.) in the state of Minas Gerais, Brazil. In *Rev. Bras. Agrometeorologia*, v (Vol. 9, Issue 3).
- Torres, F. T. P., & Machado, P. J. de O. (2008). *Introdução à Climatologia* (Série Textos Básicos de Geografia, Ed.; Geographica).
- Ussalu, J. L. M., & Bassrei, A. (2023). Long memory and trend in time series of precipitation in Mozambique. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04579-x>
- Valeriano, M. E. (2016). *Impacto das Mudanças Climáticas Sobre o Rendimento do Milho (Zea Mays) Em Sequeiro Na Bacia Do Rio Limpopo*.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Field Crops Research Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. In *Field Crops Research* (Vol. 52).
- van Rooy, M. P. (1965). *A Rainfall Anomaly Index Independent Of Time And Space*, *Notos*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130892564>
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. In *European*

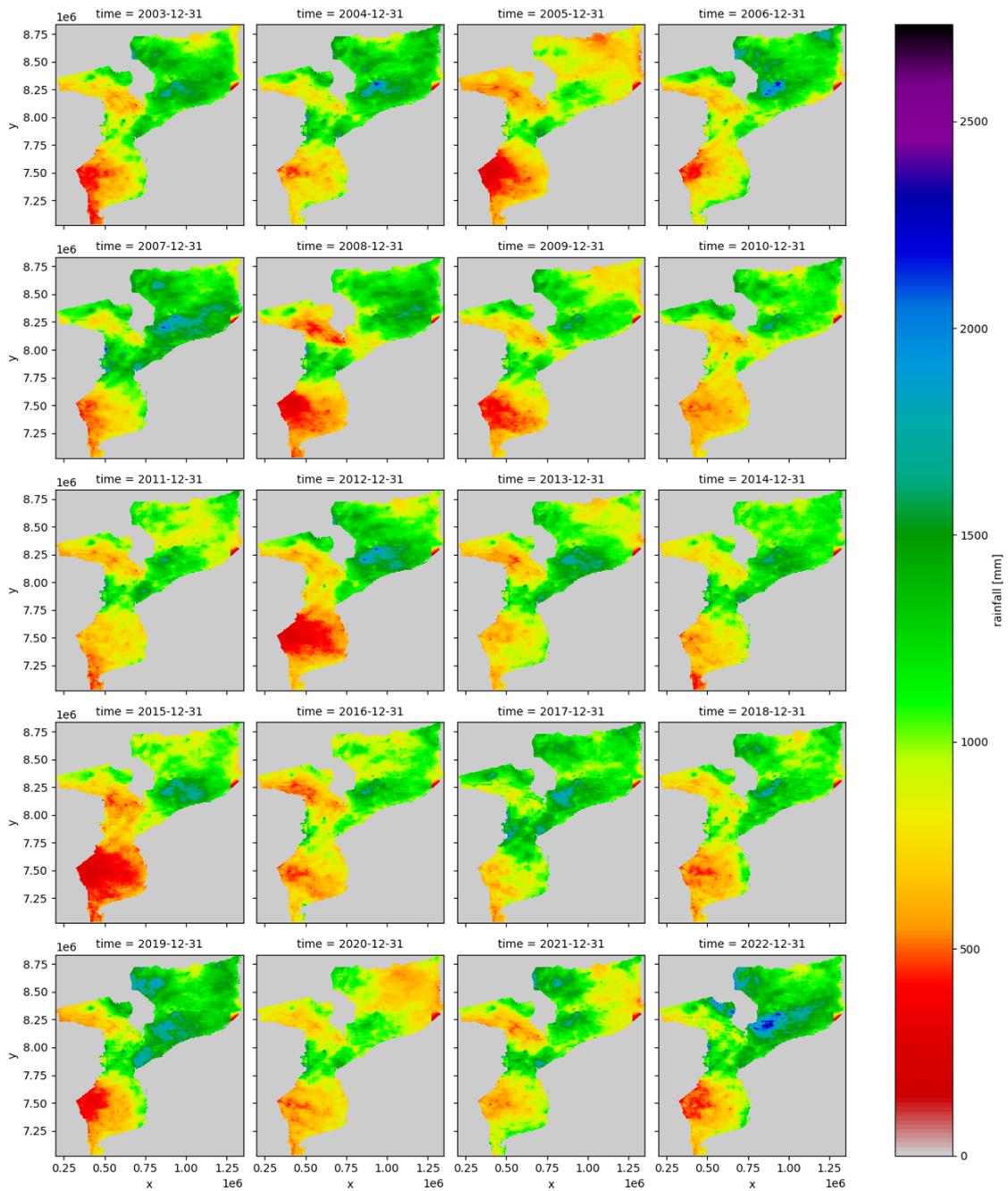
Journal of Agronomy (Vol. 83, pp. 57–77). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>

Wollmann, C. A., & Galvani, E. (2013). *Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual* (Vol. 25, Issue 1).

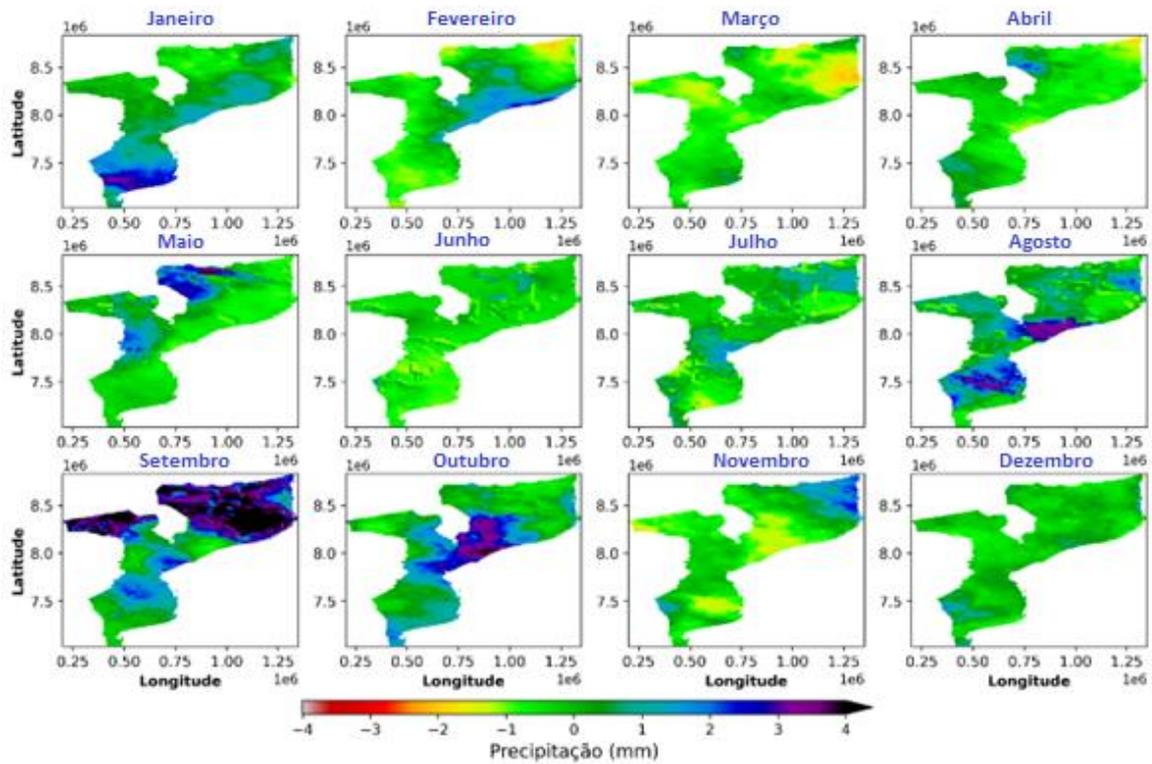
APÊNDICES

IDEstações	lonEst	latEst	NomeEstação	Data	tempmin	tempmax	tempmed	Vento	RS	Pr	SurfPr	Tdmax	Tdmin	Tdmod	Et0pm
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	07/03/2003	23.71	29.14	25.85	4.18	20.62	0.00	98186.42	25.82	18.51	22.16	4.70
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	08/03/2003	21.74	29.48	25.15	4.93	23.83	0.00	98323.34	25.39	17.90	21.65	5.03
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	09/03/2003	20.98	29.07	25.05	3.20	25.56	0.00	98279.21	24.82	17.57	21.19	5.00
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	10/03/2003	23.20	28.05	25.32	3.30	22.36	0.00	98446.28	24.80	16.55	20.67	4.83
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	11/03/2003	22.21	27.78	24.85	3.07	23.24	0.00	98527.31	24.45	14.45	19.45	4.92
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	12/03/2003	20.78	27.39	24.61	3.04	21.04	0.00	98429.66	24.35	16.11	20.23	4.21
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	13/03/2003	21.67	29.81	25.26	3.05	23.66	0.00	98300.90	24.14	14.44	19.29	5.36
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	14/03/2003	22.14	29.94	25.48	2.41	22.76	0.00	98253.34	25.10	17.02	21.06	4.84
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	15/03/2003	22.05	32.08	26.53	3.42	25.08	0.00	98144.37	24.80	14.14	19.47	6.16
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	16/03/2003	24.47	30.13	27.11	3.38	21.13	0.00	98213.20	25.27	16.10	20.68	5.31
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	17/03/2003	24.02	29.82	26.81	3.13	21.58	0.00	98505.36	25.75	16.50	21.12	5.04
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	18/03/2003	23.56	31.98	26.74	4.34	21.83	0.00	98459.38	25.76	15.35	20.55	6.01
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	19/03/2003	23.60	30.16	26.18	4.36	23.31	0.00	98418.84	25.91	17.78	21.85	5.33
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	20/03/2003	22.22	29.68	25.67	5.01	17.49	0.00	98387.42	25.68	17.23	21.45	4.45
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	21/03/2003	23.36	30.05	26.05	3.02	21.50	0.00	98256.18	25.49	16.24	20.86	4.98
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	22/03/2003	23.11	34.01	27.70	3.77	23.72	0.00	98074.16	25.66	11.84	18.75	6.81
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	23/03/2003	26.26	36.21	29.94	5.07	23.34	0.00	98041.87	26.05	12.92	19.49	8.53
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	24/03/2003	24.28	33.41	28.47	4.02	18.24	28.75	97972.72	26.15	17.72	21.93	5.58
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	25/03/2003	21.61	26.78	23.92	4.08	8.31	19.17	97980.97	25.82	18.11	21.96	2.14
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	26/03/2003	19.85	27.78	23.63	4.59	21.71	0.00	98304.70	26.08	16.51	21.29	3.78
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	27/03/2003	20.23	27.20	23.94	3.07	21.38	0.00	98630.16	26.02	16.96	21.49	3.67
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	28/03/2003	20.65	27.68	24.15	2.56	22.01	0.00	98659.79	25.93	17.61	21.77	3.87
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	29/03/2003	20.92	27.11	23.93	2.74	21.50	0.00	98578.22	25.21	15.35	20.28	4.01
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	30/03/2003	20.51	28.25	24.54	2.23	21.71	0.00	98521.66	24.62	15.47	20.05	4.20
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	31/03/2003	21.40	28.96	25.36	2.33	21.84	0.00	98540.10	24.79	16.64	20.71	4.36
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	01/04/2003	22.31	28.80	25.27	3.29	18.23	0.00	98577.76	25.09	16.62	20.85	4.14
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	02/04/2003	22.34	29.44	25.41	2.58	21.82	0.00	98519.24	25.32	17.35	21.34	4.48
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	03/04/2003	22.35	32.42	26.58	3.37	22.33	0.00	98477.52	25.23	18.49	21.86	5.30
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	04/04/2003	23.39	30.60	26.12	5.60	16.34	0.00	98682.34	25.78	18.05	21.92	4.76
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	05/04/2003	22.39	28.59	24.38	5.44	15.91	0.00	98668.88	24.56	16.28	20.42	4.39
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	06/04/2003	20.54	28.35	23.94	3.40	22.27	0.00	98423.11	24.02	11.17	17.59	4.86
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	07/04/2003	21.88	28.72	24.39	2.70	19.85	0.00	98355.57	23.70	13.45	18.57	4.51
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	08/04/2003	20.83	29.42	24.32	2.91	20.97	0.00	98248.14	23.83	12.27	18.05	4.77
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	09/04/2003	21.09	30.32	25.18	4.09	21.30	0.00	98099.73	24.79	13.07	18.93	5.21
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	10/04/2003	21.57	26.64	23.55	5.40	10.73	12.23	98451.66	24.96	15.61	20.29	3.06
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	11/04/2003	20.89	27.66	24.10	3.50	15.05	0.00	98828.28	24.70	16.33	20.51	3.34
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	12/04/2003	22.59	30.95	25.91	5.06	17.20	0.00	98876.95	24.71	16.06	20.38	5.17
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	13/04/2003	23.01	27.54	24.97	2.81	15.90	0.00	98839.02	23.82	13.32	18.57	3.98
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	14/04/2003	20.90	27.34	24.03	2.40	15.55	0.00	98727.28	23.67	13.11	18.39	3.52
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	01/01/2003	22.24	29.07	25.60	4.20	26.16	0.00	98493.45	25.11	14.48	19.80	5.91
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	02/01/2003	22.33	29.29	26.01	3.12	30.77	0.00	98388.51	25.33	16.18	20.75	6.27
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	03/01/2003	22.64	30.39	26.48	3.11	28.49	0.00	98321.64	25.35	16.54	20.95	6.21
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	04/01/2003	23.68	30.46	26.74	5.22	29.54	0.00	98268.06	24.82	17.71	21.27	6.86
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	05/01/2003	23.02	28.33	25.19	5.34	24.09	0.00	98316.84	24.74	15.59	20.16	5.70
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	06/01/2003	23.18	30.36	26.02	4.20	28.87	0.00	98356.10	25.03	14.00	19.52	6.86
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	07/01/2003	23.15	32.17	27.43	4.38	30.46	0.00	98381.86	25.39	15.47	20.43	7.41
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	08/01/2003	24.56	31.57	27.28	3.61	29.70	5.21	98163.08	25.96	17.50	21.73	6.90
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	09/01/2003	20.84	28.61	24.40	5.76	14.36	10.43	98148.80	26.78	18.15	22.47	3.16
32.6_-25.9	32.6	-25.9	Maputo	10/01/2003	18.79	23.27	21.60	6.76	8.45	0.00	98331.19	26.88	15.88	21.38	0.52

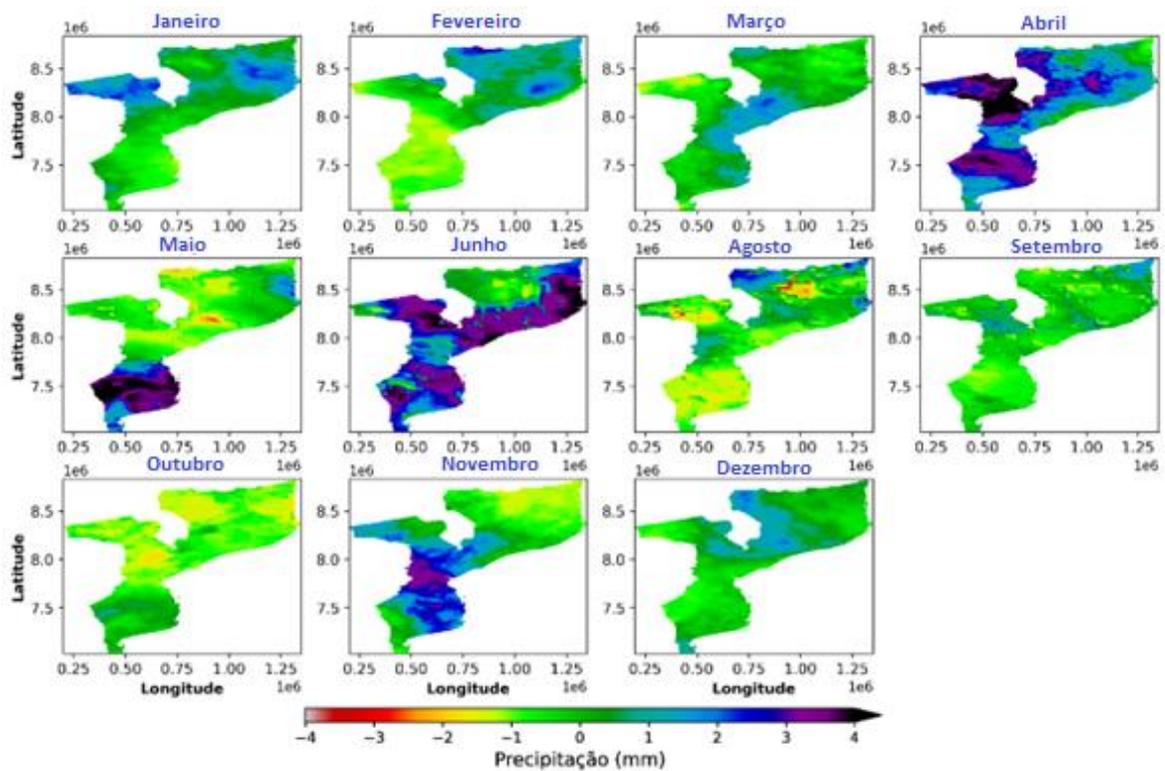
Apêndice 1: Parte dos dados climáticos diários das 15 estações meteorológicas seleccionadas em Moçambique no período de 2003 a 2022.



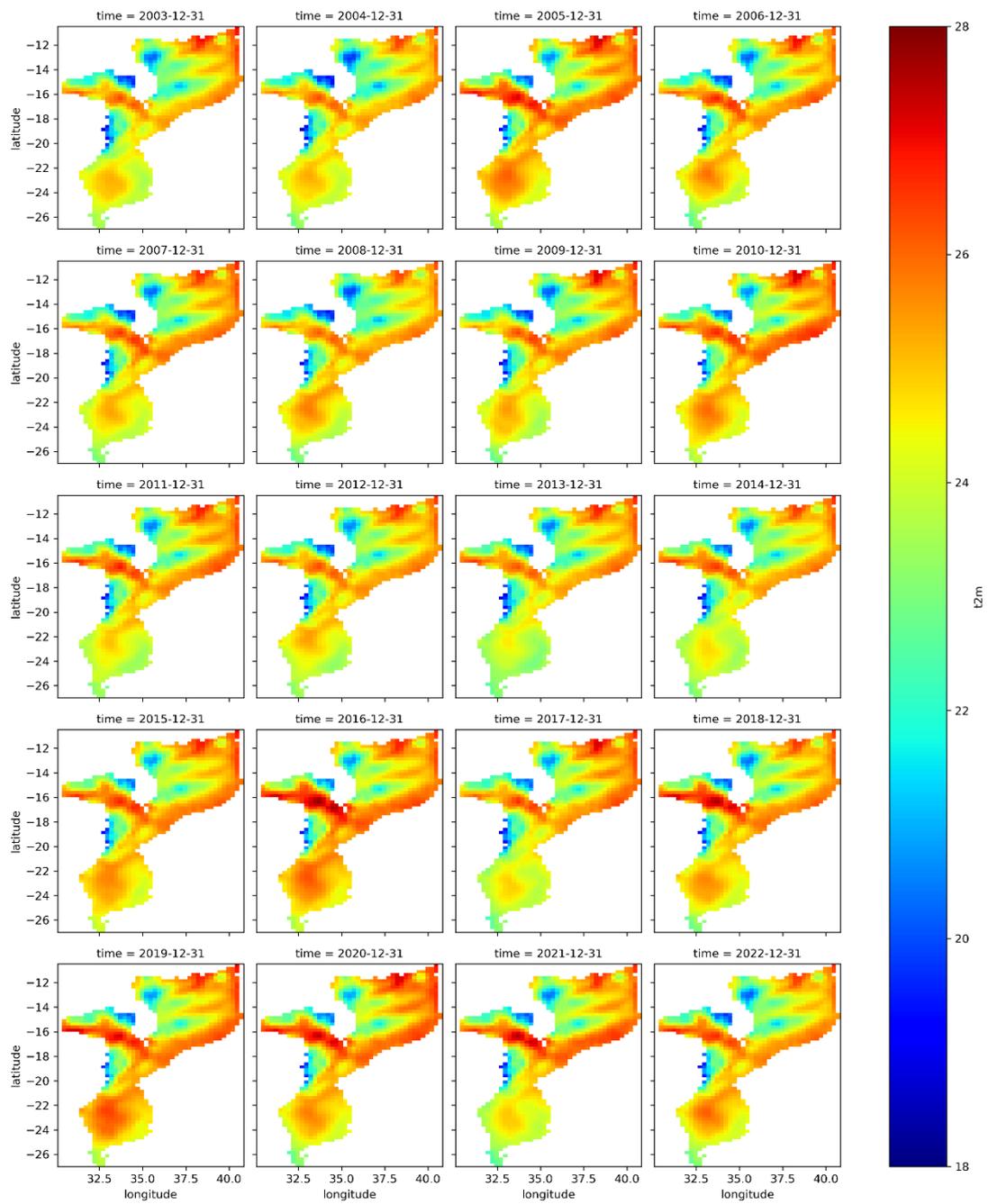
Apêndice 2: Mapa de distribuição espacial e temporal da precipitação anual por pixel no período de 2003 a 2022 em Moçambique.



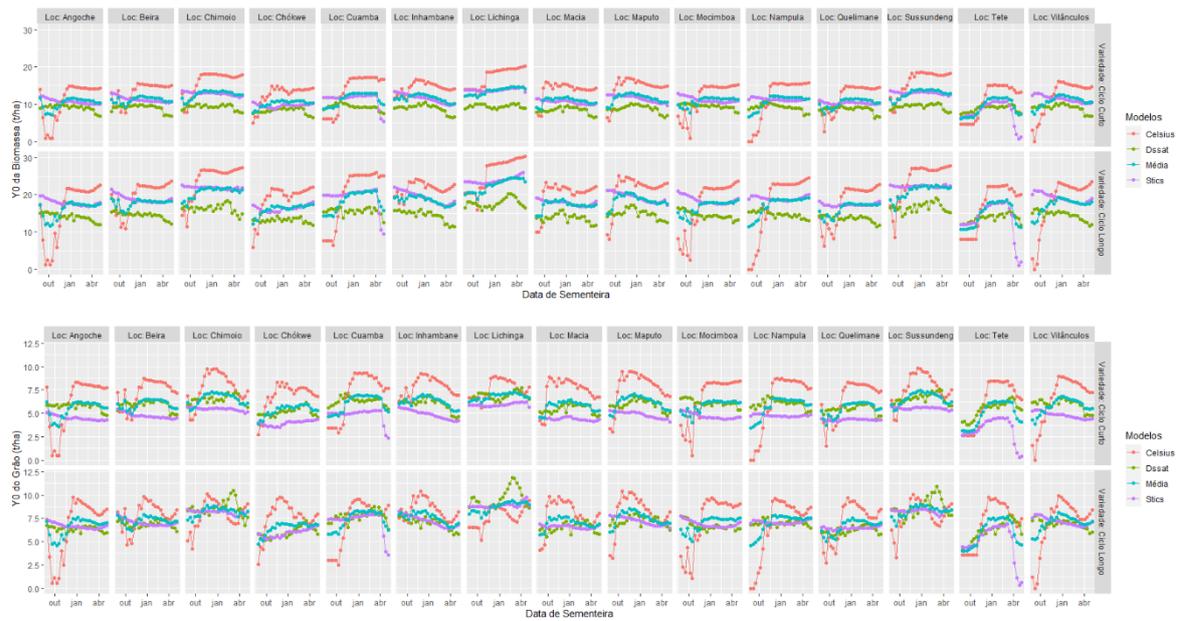
Apêndice 3: Mapa de distribuição espacial e temporal de Índice de Anomalia Padronizada por pixel para o ano de 2013.



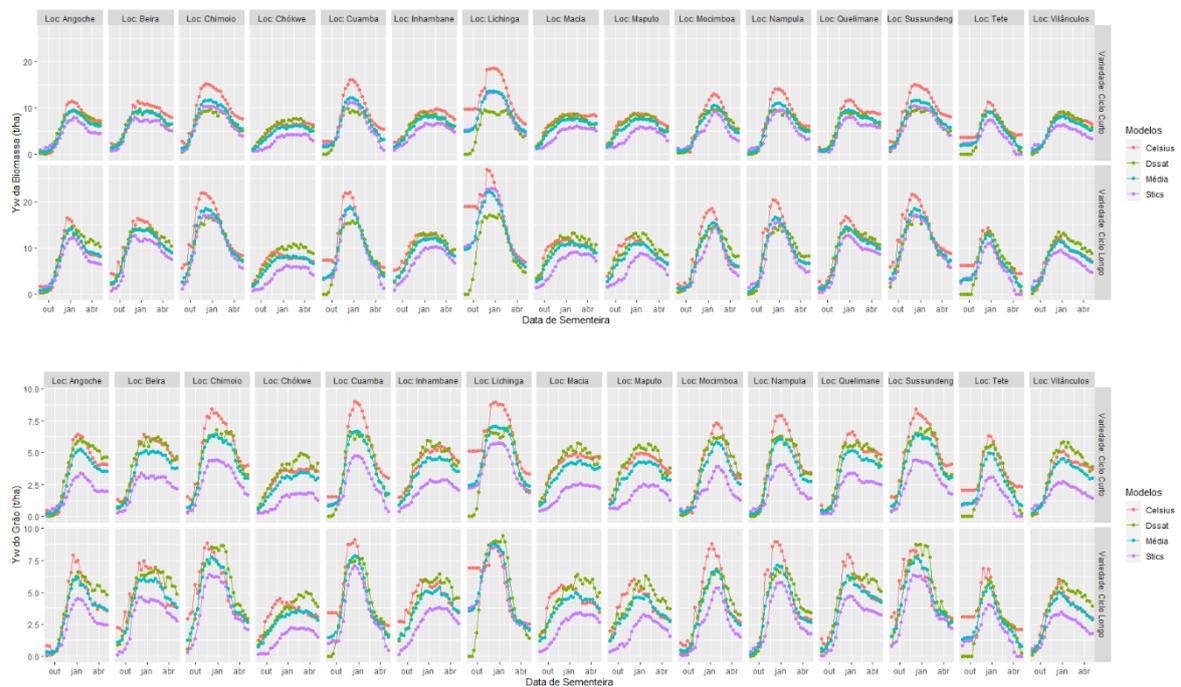
Apêndice 4: Mapa de distribuição espacial e temporal de Índice de Anomalia Padronizada de precipitação por pixel para o ano de 2022.



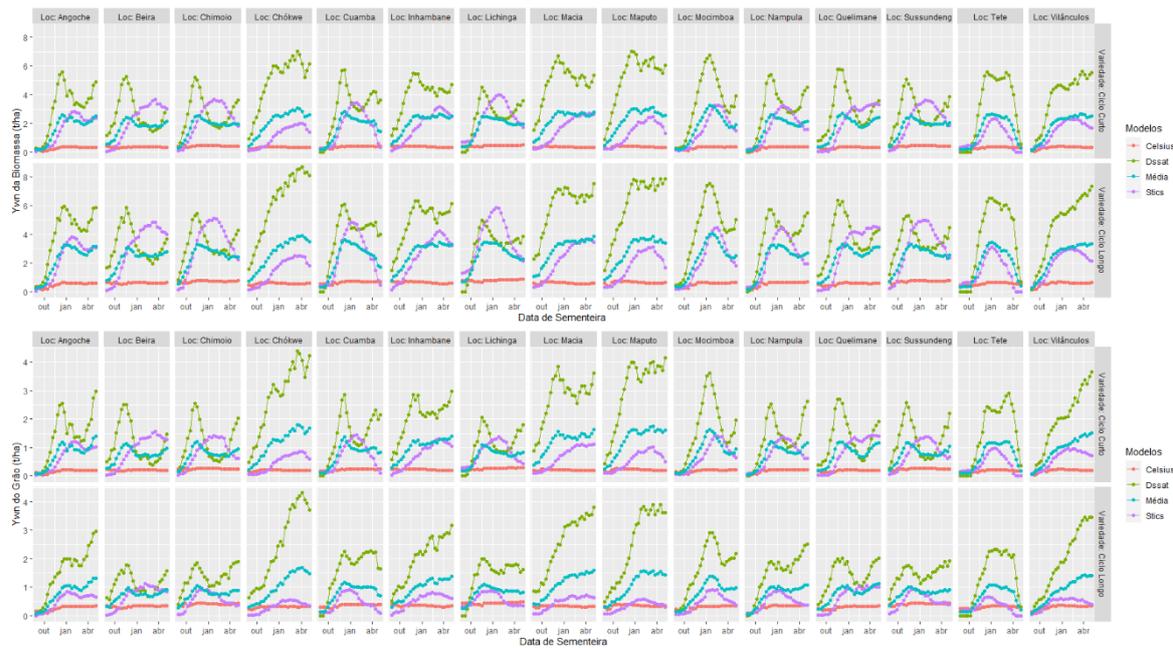
Apêndice 5: Mapa de distribuição espacial e temporal da temperatura anual por pixel de 2003 a 2022 em Moçambique.



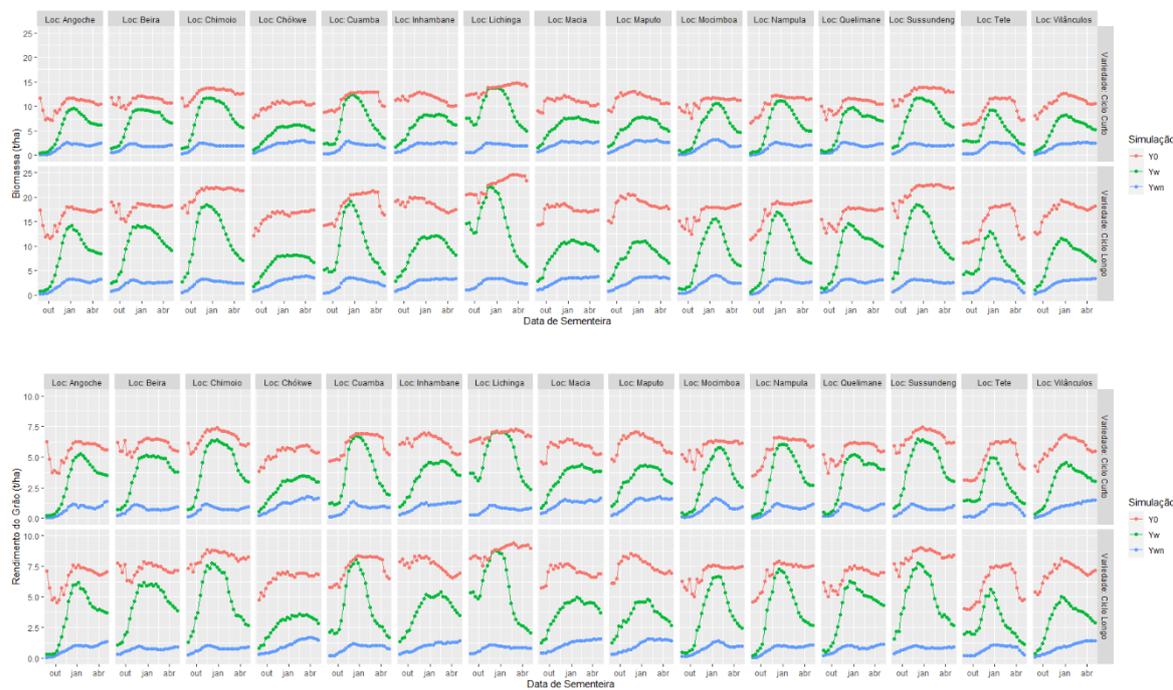
Apêndice 6: Variação do rendimento potencial da biomassa e do grão do milho em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.



Apêndice 7: Variação do rendimento potencial do grão e biomassa do milho limitado pela água em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 15 diferentes pontos de seleccionados em Moçambique.



Apêndice 8: Variação do rendimento potencial do grão e biomassa do milho limitado pela água e nitrogénio em função da data de sementeira, modelos, variedades em estudo de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.



Apêndice 9: Variação do rendimento médio da biomassa e do grão do milho em função da data de sementeira para diferentes cenários de simulação (Y0, Yn e Ywn) de 15 diferentes pontos seleccionados em Moçambique.