UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

Faculdade de Ciências

Departamento de Física

Trabalho de Licenciatura em Meteorologia

Relação entre a Temperatura da Superfície do Mar e a actividade ciclónica no Sudoeste do Oceano Índico durante o período de 2013-2023

Autora:

Eucrência da Graça Moniz

Universidade Eduardo Mondlane

Faculdade de Ciências

Departamento de Física

Trabalho de Licenciatura em Meteorologia

Relação entre a Temperatura da Superfície do Mar e a actividade ciclónica no Sudoeste do Oceano Índico durante o período de 2013-2023

Autora:

Eucrência da Graça Moniz

Supervisor:

Prof. Dr. Alberto Mavume

Co-supervisor:

Mestre Bionídio Banze

Maputo, Agosto de 2025

Declaração e compromisso de honra

Declaro pela minha honra que o Trabalho de Culminação apresentado é de minha total responsabilidade e autoria, resulta do meu empenho tendo usado para o efeito obras que se encontram devidamente citadas ao longo do trabalho assim como nas referências bibliográficas.

Maputo, Agosto de 2025

A autora

…….…….…….....

(Eucrência da Graça Moniz)

Dedicatória

A minha mãe e avó

Gizela Cândida Fernando Paulo e Rita Siquisse

Dedico este trabalho, como exemplo de esperança, resiliência, suporte e amor incondicional. A realização dos meus sonhos teve como principal suporte o vosso incentivo e desejo de orgulhar-vos, para além dos sacrifícios e esforços não mensuráveis. Por isso, sempre serei grata. Seguindo seu exemplo, pretendo tornar-me uma mulher valente, idónea, justa e gentil.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu bom Deus por toda a força e amparo que me concedeu durante toda a minha vida, sobretudo nos momentos difíceis, onde parecia que não havia uma “luz no final do túnel”. Quando mais precisei, o Senhor meu Deus estava comigo e enviou-me ajudadores, quando me sentia incapaz o Senhor dizia eu sou seu Deus que te trouxe aqui, portanto eu cuidarei de você, *filha você pode*.

Ao meu Supervisor Professor Doutor Alberto Mavume pela inspiração, pelo apoio, pelas instruções, paciência e por me incentivar a continuar.

Ao meu co-supervisor Mestre Bionídio Banze pelo apoio, “puxão de orelha”, por me ensinar a programar, por me motivar, por me fazer enxergar o meu potencial, por sempre estar disponível, pela paciência e dedicação.

Aos docentes do Departamento de Física da UEM em geral, pelos ensinamentos e incentivos.

À minha família, por todo o apoio e incentivo, principalmente à minha mãe Gizela C. F. Paulo que dedica amor incondicional a mim e aos meus irmãos. Sem ela, com certeza muitas metas em minha vida não teriam sido alcançadas e, se hoje aqui estou apresentando este trabalho, é devo isso ao seu carinho, amor, dedicação e ajuda financeira. O meu muito obrigado a essa grande mulher que sempre deu o seu melhor por mim. Amo-te mamy.

Ao meu Pai Raul Florinda por acreditar em mim. Ao meu pai Sr. Moniz por me ajudar com a primeira fundação nos meus estudos. Aos meus irmãos Imerson e Iracelma que mesmo distantes sempre me apoiam, principalmente emocionalmente.

A minha avozinha querida Rita Siquisse por depositar sua confiança e esperança em mim, por sempre orar por mim e por ser um dos motivos pelos quais pretendo conquistar territórios.

Ao meu Bispo Frank Otchere por me amar, me ajudar com o necessário, por me guiar nos caminhos de Deus com sabedoria e inteligência, por me ensinar, por declarar bênçãos sobre a minha vida. Graças a ele tenho grande parte dos conhecimentos que tenho, graças a ele conheci uma grande e linda família (Lady Rev. Adel, LP Vilma, LP Dorcia, LP Segua, LP Rhoda, entre outros). Entre eles um agradecimento especial à minha LP Vilma

e LP Dorcia por me direcionar a tomar decisões corretas, por me amar como filha. Não poderia expressar em palavras a minha gratidão.

Ao meu amigo especial Bruno Fernando pelo apoio, conselho, encorajamento e companheirismo que foram essenciais no processo de realização do projecto.

Ao meu primeiro apascentador Ramos por me amar genuinamente, por me guiar com sabedoria, por me ensinar a orar e me incentivar a servir a Deus. A minha amiga e apascentadora Dorcas Mabunda, pela amizade preciosa, por estar disposta a me ajudar sempre que necessário, por festejar e chorar comigo, por me fazer sentir compreendida, por me ensinar a colocar as necessidades dos outros acima da minha.

A minha amiga e irmã Chantel Hebe Faria (Chantel da Vida Real) por *(eh ya são maningue cenas)* me incentivar a acreditar em mim, na minha real identidade, por ser uma irmã com quem posso contar para tudo, por me fazer sentir compreendida.

Aos meus amigos mais antigos Isaura Saranga, pelo voto de confiança, amizade preciosa e constante, Delfino Maló, pelo amor incondicional, genuíno e por sempre estar aí para mim.

Aos meus amigos não muito antigos, Klígina da Lends e Kárcia Bomba, pelos ensinamentos e companheirismo, Júnior Tomo, pela companhia, orações e por sempre ser o ombro amigo com quem posso contar.

A minha amiga e irmã Patrícia Patrício, pelo suporte, por guerrear comigo as minhas lutas, por sempre me perdoar e pelo seu senso de humor agradável.

Aos meus amigos da faculdade, Eulália Chiau, Rosita Mutimucuio, em especial a Rosymary Magalhães por ser constante e por me ajudar com recursos para elaboração deste trabalho, ao Chane Pinto por eu sempre poder contar com ele, por ser um membro fiel nos meus trabalhos em grupo, a Cristina Mabunda pela generosidade e por me "adoptar" em sua família e Lúcio Nhampimbe por me ajudar com questões de programação em Python e por me encorajar.

As minhas colegas do quarto da residência 7 da UEM, Fátima Mawane, Tamar Mejo e Sérgia Bibí, pela convivência e momentos de aprendizado.

Ao pessoal do INAM em especial ao Sr. Ismael, Sr. Mapulende, Sr. Mundo, a Sra. Alexandrina, Dona Marta, Dona Laura, Dona Celeste e Dona Isabel, pelo apoio e disponibilidade de recursos que foram úteis para a realização deste trabalho.

E a todos que não terei aqui mencionado, mas que me ajudaram, directa ou indirectamente a alcançar os meus objectivos, agradeço e que Deus os retribua.

Se te fatigas correndo com homens que vão a pé, como poderás competir com cavalos?
Se tão somente numa terra de paz estás confiado, que farás na enchente do Jordão?

Jeremias 12:5

Resumo

Com as mudanças climáticas globais, observa-se um aumento gradual na temperatura média da Terra, favorecendo a intensificação e a frequência de eventos extremos, como os ciclones tropicais. No sudoeste do Oceano Índico (SWIO), esses sistemas constituem importantes fenómenos ambientais, responsáveis por perdas humanas e materiais significativos, especialmente em países costeiros como Moçambique e Madagáscar. Apesar do seu elevado impacto, os ciclones tropicais nesta região ainda são menos investigados em comparação com outras bacias oceânicas. Este trabalho analisou a relação entre a variação da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e a actividade ciclónica no sudoeste do Oceano Índico entre 2013 e 2023. O objectivo principal foi avaliar em que medida as variações da TSM influenciam a formação e intensificação dos ciclones tropicais, com ênfase na distribuição espacial, tendência temporal da TSM e sua relação com a intensidade dos sistemas. Foram utilizados dados de reanálise do modelo ERA5 e dados históricos da base IBTrACS, processados com ferramentas como Python (via Google Colab), integrando técnicas de análise estatística e visualização espacial. A distribuição espacial indicou que os ciclones se formam preferencialmente sobre regiões com TSM mais elevadas, sobretudo no centro e norte do SWIO. No entanto, a análise estatística revelou uma correlação fraca entre a TSM e a intensidade máxima dos ciclones, indicando que outros factores atmosféricos exercem influência significativa sobre sua intensificação. Conclui-se que o aquecimento progressivo das águas do sudoeste do Oceano Índico favorece a formação dos ciclones, mas sua intensidade está condicionada à interação de múltiplos fatores. Este estudo reforça a importância de abordagens multidimensionais para o monitoramento e gestão de riscos climáticos

Palavras-chave: temperatura da superfície do mar, ciclones tropicais, intensidade máxima.

Abstract

With global climate change, a gradual increase in the Earth's average temperature is being observed, favoring the intensification and frequency of extreme events such as tropical cyclones. In the southwestern Indian Ocean (SWIO), these systems constitute important environmental phenomena, responsible for significant human and material losses, especially in coastal countries such as Mozambique and Madagascar. Despite their significant impact, tropical cyclones in this region remain less studied compared to other ocean basins. This study analyzed the relationship between Sea Surface Temperature (SST) variations and cyclonic activity in the southwestern Indian Ocean between 2013 and 2023. The main objective was to assess the extent to which SST variations influence the formation and intensification of tropical cyclones, with an emphasis on the spatial distribution, temporal trends of SSTs, and their relationship to the intensity of these systems. Reanalysis data from the ERA5 model and historical data from the IBTrACS database were used, processed with tools such as Python (via Google Colab), integrating statistical analysis and spatial visualization techniques. The spatial distribution indicated that cyclones form preferentially over regions with higher SSTs, especially in the central and northern SWIO. However, statistical analysis revealed a weak correlation between SST and maximum cyclone intensity, indicating that other atmospheric factors significantly influence their intensification. It is concluded that the progressive warming of the waters of the southwestern Indian Ocean favors cyclone formation, but their intensity is conditioned by the interaction of multiple factors. This study reinforces the importance of multidimensional approaches to climate risk monitoring and management.

Keywords: sea surface temperature, tropical cyclones, maximum intensity.

Índice

Lista de Abreviaturas XII

Lista de Figuras XIII

Lista de Tabela XV

1. Capítulo I – Introdução e Objectivos 16

1.1 Introdução 16

1.2 Justificativa 18

1.3 Definição do problema 19

1.4 Hipótese 19

1.5 Objectivos 20

1.5.1 Objectivo geral 20

1.5.2 Objectivos específicos 20

2. Capítulo II – Revisão de Literatura 21

2.1 Caracterização da área de estudo 21

2.1.1 Costa de Moçambique 21

2.2 Temperatura da Superfície do Mar 22

2.3 Ciclones Tropicais 23

2.3.1 Condições para a Formação de Ciclones Tropicais 25

2.3.2 Ciclo de vida dos ciclones tropicais 27

2.3.3 Desenvolvimento e Intensificação dos ciclones tropicais 29

2.3.4 Classificação de Ciclones usada no Sudoeste do Oceano Índico 31

2.4 Intensidade Potencial Máxima 31

2 Capítulo III – Metodologia 31

3.1 Materiais 32

3.2 Métodos 34

3.2.1. Análise da Temperatura da Superfície do Mar e Actividade Ciclónica 34

3.2.2 Análise da Intensidade 35
3.2.3 Análise Estatística da Relação entre a TSM e a Intensidade dos Ciclones 36
3.2.4 Análise da Relação entre a TSM e a MPI dos Ciclones 38
4 Capítulo IV – Resultados e discussão 39
4.1 Padrões Temporais e Espaciais da TSM e da Actividade Ciclónica no SWIO 39
4.2 Variabilidade Interanual da Intensidade dos Ciclones Tropicais 42
4.3 Relação entre TSM e Intensidade dos Ciclones Tropicais 44
5 Capítulo V – Conclusões e Recomendações 48
5.1 Conclusão 48
5.2 Recomendações para trabalhos futuros 49
6 Referências Bibliográficas 50

Lista de Abreviaturas

CISK – Conditional Instability of Second Kind

CLP – Camada Limite Planetária

CT – Ciclone Tropical

ECMWF – European Centers for Medium-Range Weather Forecast

ERA5 – ECMWF Reanalysis 5th generation

HN – Hemisfério Norte

HS – Hemisfério Sul

IBTrACS – International Best Track Archive for Climate Stewardship

INAM – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas

KDE – Kernel Density Estimation (Estimativas da densidade de Kernel)

MPI – Maximum Potential Intensification (Intensificação Potencial Máxima)

SWIO – Southwest Indian Ocean (Sudoeste do Oceano Índico)

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UEM – Universidade Eduardo Mondlane

Vmax – Vento Máximo

WISHE – Wind-Induced Surface Heart Exchange

WMO – Organização Meteorológica Mundial

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

Lista de Figuras

Figura 1: Sudoeste do Oceano Índico (SWOI), Latitude 0° a 40°S e Longitude 30°E a 90°E.....21

Figura 2: Distribuição global da temperatura da superfície do mar 23

Figura 3: Imagem do ciclone tropical denominado Olivia 24

Figura 4: Constituição de um ciclone tropical: ilho paredes do olho às bandas de chuva 25

Figura 5: Modelo de uma Onda de Leste. A área pintada indica a região de convergência dos ventos em superfície 27

Figura 6: Diagrama esquemático ilustrando o ciclo de vida de um ciclone tropical 28

Figura 7: Diagrama esquemático do fluxo de energia térmica em um ciclone tropical idealizado conforme um motor que segue o ciclo de Carnot 30

Figura 8: Ciclo anual de ciclones tropicais no SWIO de acordo com os dados do IBTrACS, entre as temporadas de 1980 e 2019 32

Figura 9: Série temporal da TSM durante a temporada ciclónica do período em estudo.…….....…….……..39

Figura 10: Distribuição espacial da temperatura da superfície do mar em cada temporada ciclónica, a partir de 2013-2014 a 2022-2023 40

Figura 11: Variabilidade interanual de ciclones tropicais no SWIO discriminada pela intensidade dos sistemas.……..……...……42

Figura 12: Matriz de correlação entre TSM e a velocidade máxima sustentada do vento dos ciclones.....……...……...43

Figura 13: Matriz de dispersão entre TSM e a velocidade máxima sustentada do vento dos ciclones.....44

Figura 14: Diagrama de dispersão de intensidade em relação a TSM para todos os casos de TC no SWIO durante 2013-2023. A intensidade ajustada neste estudo (preta) é comparada com a intensidade ajustada com outros autores do Atlântico Norte……48

Lista de Tabela

Tabela 1: Classificação de ciclones usada no SWIO de acordo com o Vmax……...…33

Tabela 2: DataFrame usado para a análise interanual da intensidade dos ciclones no SWIO de 2013 a 2023…….35

1. Capítulo I – Introdução e Objectivos

1.1 Introdução

Com o crescente aumento da temperatura do globo terrestre, tem se notado a ocorrência de eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes e intensos causando desastres como perdas de vidas humanas, destruição de infraestruturas entre outros. Os ciclones tropicais são um desses fenômenos que tem causado vários danos por onde passam, eles têm impactos significativos nas regiões costeiras de todo o mundo, causando uma série de alterações na superfície do oceano, que variam em função de sua intensidade e a região em que ocorrem. À medida que se aproximam da costa, estes sistemas são também capazes de originar marés, elevação do nível do mar e ondas fortes proporcionais à intensidade dos ventos (Jilong & et al, 2020), com um poder devastador equiparado ao da precipitação e ao do vento.

A vulnerabilidade de Moçambique às mudanças climáticas é uma função da sua localização e geografia: grandes áreas do país estão expostas a ciclones tropicais, secas e rios/tempestades costeiras provocam cheias. Esta vulnerabilidade é agravada pelos 2.470 km de costa do país (Hoguane, 2007) e pela fragilidade socioeconómica.

A localização costeira de Moçambique significa que este país se encontra no trajeto de ciclones altamente destrutivos que ocorrem durante a estação húmida (Rebelo, 2020) devido ao facto de ser "a fronteira ocidental de uma das mais activas bacias dos ciclones tropicais, o sudoeste do oceano Índico".

Segundo Mussa Mustafa 2000, citado por Brito 2003, os ciclones mais intensos que afetam a costa de Moçambique são os formados a Este do Oceano Índico, pois estes carregam mais humidade em relação aos formados a Oeste.

Segundo a definição usada no Sudoeste do Oceano Índico, um ciclone tropical é uma perturbação atmosférica associada a uma depressão muito intensa geralmente de ventos turbulentos intensos ultrapassando um limiar de 63km/h. Ele ocorre com maior frequência nos meses de verão em regiões oceânicas tropicais e subtropicais (Bié, 2022), onde a temperatura média das águas é relativamente elevada, igual ou superior a 26.5ºC, ocorrendo geralmente entre as latitudes de 5ºS e 25ºS sendo a exceção do Atlântico Sul e Sudoeste do Pacífico (Matimbe, 2004).

A importância das TSMs quentes para o desenvolvimento e intensificação de CTs é conhecida há muito tempo, pois os fluxos de calor latente e sensível dos oceanos fornecem a energia potencial para os CTs, (Lavender, 2018).

Segundo Lavender (2018), Palmén (1948) foi o primeiro a documentar que os CTs ocorrem apenas em oceanos com temperatura crítica de 26 – 27 ◦C e posteriormente esta temperatura limite foi revisitada por Dare e McBride (2011) usando observações de 1981 a 2008 com resultados consistentes com esses estudos anteriores. Eles encontraram que a maioria (93%) dos CTs ocorre em TSM maiores que 26,5 ◦C e acima de 98% em TSM superiores a 25,5 ◦C. A tendência positiva da TSM durante o período de estudo não levou a uma mudança nesta temperatura limite.

Embora o limiar de TSM de 26 -27ºC seja amplamente usado para definir critérios de formação de CTs (Mavume & et al, 2009), a sua formação em águas oceânicas abaixo desse limiar já foi reportada. Eles se formam a partir de distúrbios tropicais pré-existentes que muitas vezes são desprendidos de áreas de baixa pressão associadas à ZCIT ou ao cavado de monção, a partir de distúrbios embebidos em ondas de leste ou ainda a partir de sistemas de distúrbios de latitudes médias que passam por transição tropical (como é o caso do Furacão Catarina 2004 no Atlântico Sul), (Bié, 2022).

Na década de 1990, Shapiro e Keyser, estudando casos de ciclogéneses com rápida intensificação, verificaram que em alguns ciclones a frente fria deslocava-se perpendicular à frente quente de forma que essas, geralmente, não se encontravam. Com isso, surgiu outro modelo conceitual de ciclones, o chamado modelo de Shapiro e Keyser (Reboita, Gan, & Rocha, 2017).

A temperatura global aumentou aproximadamente 1ºC em comparação com a média entre 1860 e 1880 (Thomas & et al, 2017), este acréscimo na temperatura é associado ao número de mudanças no sistema climático que aumenta o risco de eventos extremos no tempo. Projeções da actividade dos ciclones tropicais para o futuro devido ao aquecimento climático indicam um decréscimo em todas actividades, mas ao mesmo tempo, o aumento dramático na ocorrência dos mais devastadores ciclones (Jilong & et al, 2020). Para um aquecimento de 2.5ºC até o final do século, a probabilidade de ocorrência de ciclones da categoria 4 ou 5 será aproximadamente o dobro sobre todas bacias relativamente ao passado recente (Thomas & et al, 2017).

A formação dos ciclones tropicais é influenciada por muitos factores, mas o papel do aumento da temperatura da superfície do mar como a origem principal da energia dos ciclones é o factor supremo (Thomas & et al, 2017).

A TMS foi historicamente uma das primeiras variáveis oceanográficas a serem medidas, sendo as importantes e rotineiras coletas a bordo dos navios Cook (1772-1775) os primeiros exemplos de dados de perfil oceanográfico registados e preservados (Santos, 2019). A TSM é fundamental para o entendimento do fluxo de energia na superfície e da interação oceano-atmosfera, principal controlador e indicador da variabilidade climática.

A principal motivação para o estudo da tendência da TSM e do seu impacto sobre os ciclones tropicais no sudoeste do Oceano Índico é compreender os factores que contribuem para a intensificação destes fenómenos. Considerando que a TSM representa a principal fonte de energia para os ciclones tropicais, analisar a sua possível influência sobre a intensidade desses sistemas torna-se fundamental. Esta compreensão permite não apenas aprofundar o conhecimento científico sobre a dinâmica ciclónica na região, mas também apoiar acções de mitigação, visando a redução de perdas humanas e materiais, sobretudo nas áreas costeiras vulneráveis do sudoeste do Oceano Índico, como Moçambique.

Assim, o objectivo desta pesquisa é analisar se existe uma relação estatisticamente significativa entre a TSM e a actividade ciclónica no sudoeste do Oceano Índico, com ênfase na intensidade dos ciclones tropicais ocorridos entre 2013 e 2023.

1.2 Justificativa

O aumento da temperatura média da Terra tem impactos negativos para os seres viventes na Terra, principalmente porque influencia directamente no aumento da temperatura da superfície do mar, que é o principal controlador e indicador da variabilidade climática (Santos, 2019), fluxo de energia na superfície e da interação oceano-atmosfera. Um dos impactos negativos é a ocorrência de eventos extremos como a seca, ciclones, tempestades, entre outros. Dentre vários factores que causam os Ciclones Tropicais, um deles é o aquecimento das águas superficiais nos oceanos com a temperatura mínima de 26.5ºC (Matimbe, 2004; Lavender, 2018; Bié, 2022), este factor causa grande evaporação,

o que por sua vez causa alta humidade, sendo assim a principal origem da energia que alimenta os ciclones (Thomas et al, 2017).

Moçambique, por sua localização geográfica estratégica e extensa linha costeira, é altamente exposto à ocorrência de ciclones tropicais que se formam ou transitam pelo Canal de Moçambique. Esses eventos têm provocado perdas humanas, deslocamentos populacionais, destruição de infraestruturas e prejuízos econômicos consideráveis, especialmente nas regiões centro e norte do país.

Diante disso, compreender a relação entre a TSM e a actividade ciclónica no Sudoeste do Oceano Índico é essencial para ampliar o conhecimento científico regional, apoiar a formulação de estratégias de gestão de risco e fortalecer os sistemas de aviso prévio. Este trabalho justifica-se, assim, pela necessidade de aprofundar a investigação sobre a ligação entre a variabilidade térmica das águas oceânicas e a intensificação dos ciclones tropicais que afetam Moçambique, visando subsidiar políticas públicas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

1.3 Definição do problema

Embora a literatura reconheça a importância da TSM na sustentação energética dos ciclones tropicais, há uma lacuna de estudos regionais que explorem quantitativamente a relação entre as anomalias térmicas do mar e o comportamento ciclónico no Sudoeste do Oceano Índico.

Dessa forma, o problema de pesquisa que se coloca é:

- Em que medida as variações da temperatura da superfície do mar influenciaram na intensidade dos ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico, entre 2013 e 2023?

1.4 Hipótese

Considerando que os ciclones tropicais dependem do calor e da humidade transferidos da superfície oceânica para a atmosfera, formula-se a seguinte hipótese:

A elevação da temperatura da superfície do mar no Sudoeste do Oceano Índico contribui para o aumento da intensidade dos ciclones tropicais que se formam na região.

1.5 Objectivos

1.5.1 Objectivo geral

- Investigar a relação entre a variação da temperatura da superfície do mar e a actividade ciclónica no Sudoeste do Oceano Índico no período de 2013-2023.

1.5.2 Objectivos específicos

- Fazer a distribuição espacial da temperatura média da superfície do mar e dos ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico;
- Determinar a tendência da temperatura da superfície do mar durante o período de estudo;
- Analisar a relação entre a temperatura da superfície do mar, a intensidade de ciclones tropicais e a intensidade máxima potencial dos mesmos.

2. Capítulo II – Revisão de Literatura

Neste capítulo faz-se uma revisão bibliográfica, iniciando por apresentar informação básica sobre a área de estudo, aspectos gerais da temperatura a superfície dos oceanos e dos ciclones tropicais.

2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo para este trabalho cobre a região sudoeste do Oceano Índico (SWOI), Figura 1, desde do Equador, 0° até 40°S (latitudes) e costa da África por volta de 30°E até o meridiano de 90°E (longitude), delimitação oficial da bacia ciclónica SWOI monitorada pelo RSMC - La Réunion da Météo-France (WMO, 2018). Essa delimitação está em alinhamento com o uso operacional desde a extensão de 2003, com a vigência atual desse recorte geográfico. Esta região é responsável por aproximadamente 10% dos ciclones tropicais na Terra ou 14% segundo Bié (2022) e Matyas (2014).

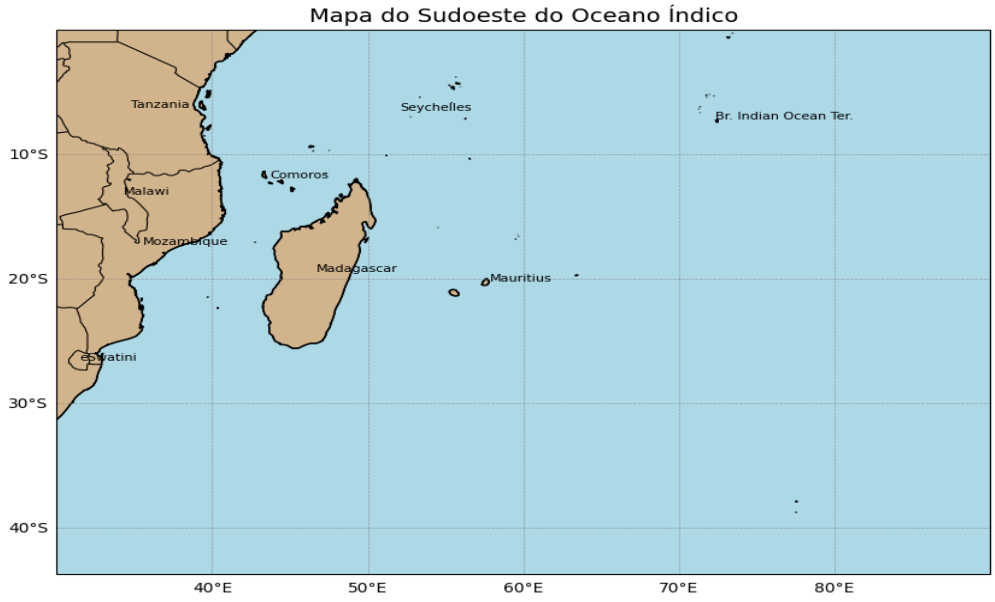

Figura 1: Sudoeste do Oceano Índico (SWOI), Latitude 0° a 40°S e Longitude 30°E a 90°E.

2.1.1 Costa de Moçambique

Moçambique localiza-se na costa oriental de África, entre as Latitudes 10°20’ S e 26°50’ S, (Hoguane, 2007). A superfície moçambicana é de cerca de 790 380 km2 distribuídos

da seguinte forma: 786 380 km2 de Terra firme e 13 000 km2 de águas interiores, (José, 2020).

A penetração dos CTs às regiões costeiras tende a ter consequências desastrosas, devido ao vento forte, precipitação intensa e inundações causadas pela sobre-elevação do nível do mar que pode atingir mais de 5m (Bié, 2022).

A costa tem uma extensão de 2 515 km, é alta e rochosa a norte e baixa e arenosa a sul. Ao longo dela, podem ser assinalados alguns acidentes, destacando-se: cabos, baías e ilhas, (José, 2020).

Costa – zona de contacto entre a terra e o mar. Corresponde ao limite entre o oceano e o continente. Existem dois tipos de costa: a baixa quando a linha da costa insere numa zona de baixa altitude, geralmente plano (praia) e alta quando a linha de costa se insere num relevo alto. Apresenta uma vertente inclinada directamente para o mar. Corresponde a locais com rochas relativamente duras e por isso de difícil erosão. (José, 2020).

2.2 Temperatura da Superfície do Mar

A temperatura da superfície do mar nos trópicos está acima de 20ºC, reduzindo para 15ºC nas regiões temperadas e chegando nos limites dos polos a temperaturas mais baixas (como ilustrado na figura abaixo). A temperatura diminui gradualmente da linha do equador para os polos, variando até 2ºC em altas latitudes, e altera-se em média 0,5ºC para cada grau de latitude percorrida. Os valores apresentam variabilidade tanto em escala vertical quanto na escala horizontal. Nesta última apresentam, em geral, linhas da mesma temperatura chamadas isotermas (Santos, 2019).

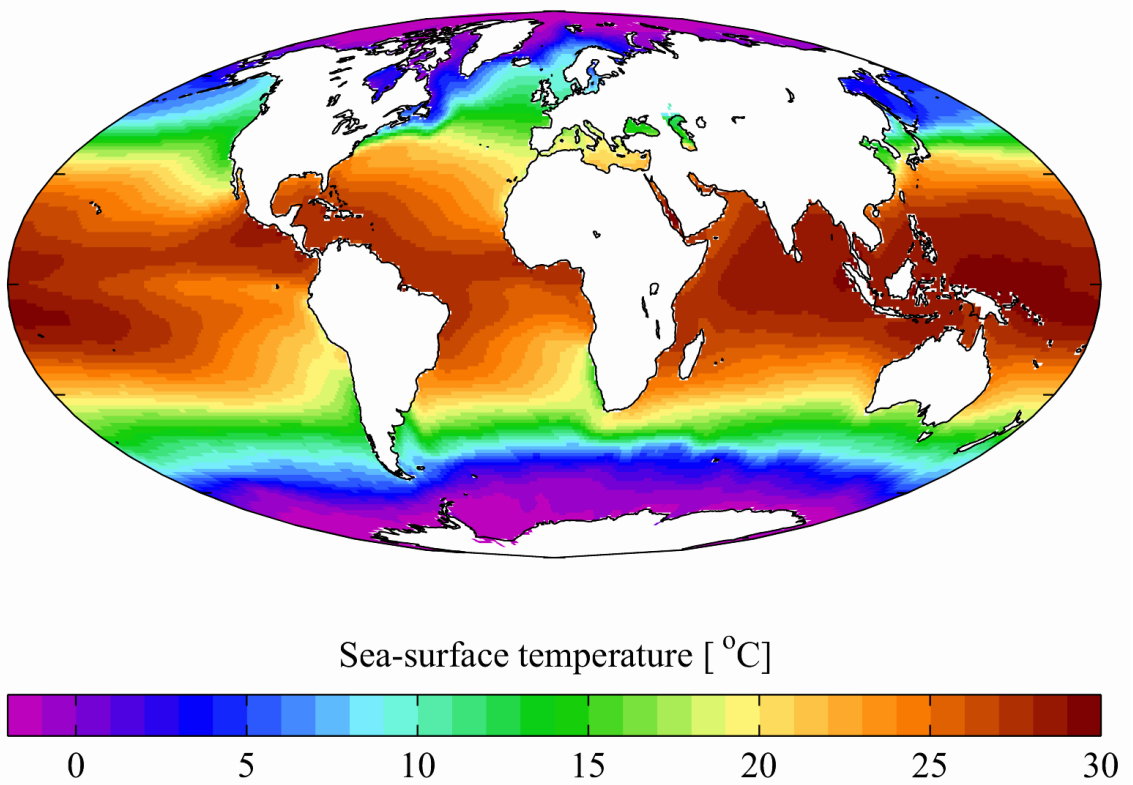

Figura 2: Distribuição global da temperatura da superfície do mar.

Fonte:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/Sea_surface_temperature_2001.png

2.3 Ciclones Tropicais

Os ciclones tropicais são definidos como um vórtice de rotação ciclónica (horária no hemisfério sul e anti-horária no hemisfério norte) de escala sinóptica, podendo alcançar diâmetros que vão desde pequenas unidades até centenas de quilômetros (Cavalcante, 2018) e são menores comparativamente aos dos ciclones extratropicais, com ventos mais intensos nos níveis mais baixos da troposfera (Chauque, 2019).

Segundo Holland, 1993, citado por Cavalcante, 2018, os CTs são sistemas de baixa pressão de núcleo quente, formados sobre os oceanos e que apresentam convecção persistente. Ocorrem normalmente sobre águas tropicais por estarem fortemente associados à transferência de calor latente na interface ar-mar, e por conta disso, a sua dissipação ocorre ao atingir o continente, ou águas mais frias. Sua estrutura caracteriza-se pela presença de circulação ciclónica fechada em baixos níveis (convergência) e anticiclónica em altos níveis (divergência), promovendo a ascensão profunda do ar.

Este fenômeno natural é denominado ciclone tropical na região do oceano Índico (Figura 3), porém, o mesmo fenômeno tenha outras designações em outras regiões: Tufão no Nordeste do Pacífico e Oeste do Meridiano de Greenwish e Furacão no Norte do Atlântico e a Leste do Meridiano de Greenwish.

No Sudoeste do Oceano Índico (SWIO), os ciclones são gerados principalmente entre Novembro e Abril, com uma média de 12 por ano (Mavume & et al, 2009).

Os ciclones geralmente movimentam-se para o Oeste acompanhando os ventos alísios, podem causar inundações severas para além das chuvas fortes. O seu centro possui pressões muito baixas, geralmente inferiores a 950mb.

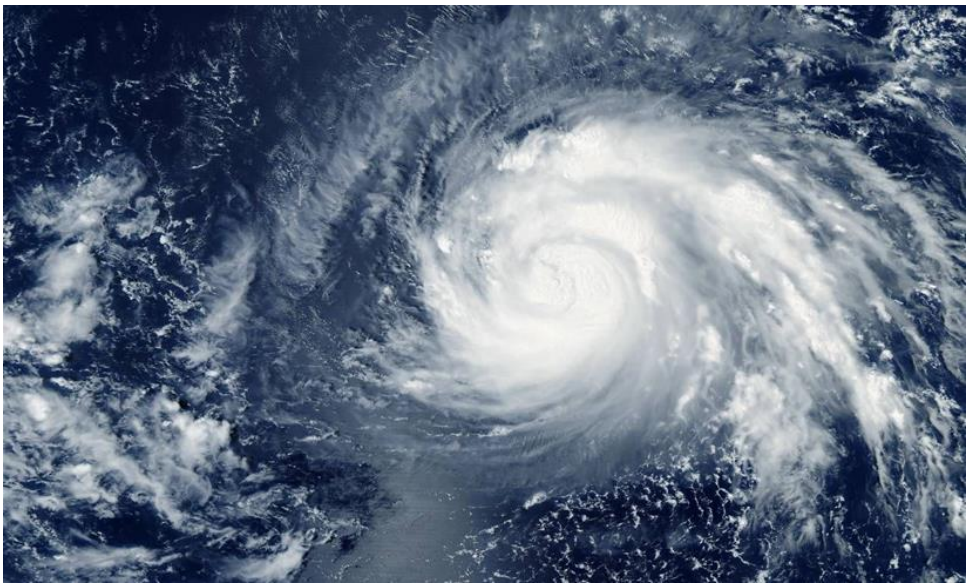

Figura 3: Imagem do ciclone tropical denominado Olivia.
Fonte: https://www.tempo.pt/noticias/ciencia/ciclone-tropical-olivia-rajada-vento-mais-poderosa-sempre-barrow-island.html

O centro de um ciclone, comumente denominado "olho" é caracterizado por ventos fracos e poucas nuvens, esta zona é formada quando o ar que se eleva na faixa de tempestades acaba descendo no centro do sistema, o ar que desce cria uma condição de céu claro no centro (como ilustra a Figura 4). O diâmetro do círculo (olho) varia de ciclone, sendo geralmente de 20 a 50 km.

Em volta do olho do ciclone existe uma área denominada "parede de olho" cujos ventos da superfície são mais intensos.

A convecção em ciclones tropicais é organizada e alongada na mesma orientação do vento horizontal sendo chamada de bandas espirais, ao longo dessas bandas, a convergência em baixos níveis é máxima e, assim, a divergência é bem pronunciada nos altos níveis (Brito, 2003).

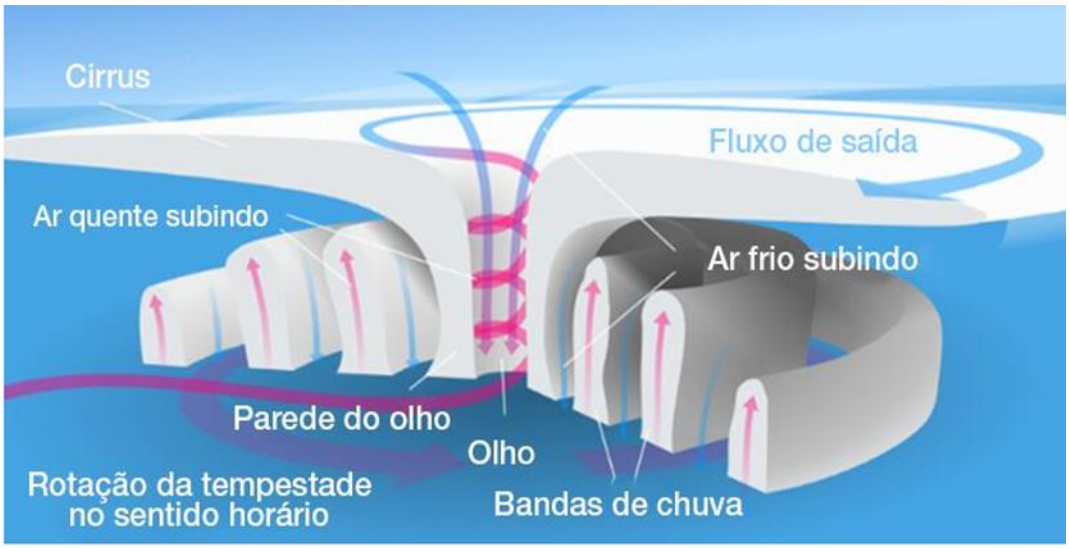

Figura 4: Constituição de um ciclone tropical: olho, paredes do olho às bandas de chuva.

Fonte: StormGeo.

2.3.1 Condições para a Formação de Ciclones Tropicais

Para a formação de ciclones tropicais é necessário que haja condições mínimas ambientais cooperando entre si (Cavalcante, 2018), (Mathias, 2012), (Reboita, Gan, & Rocha, 2017), tais como:

- A TSM deve ser suficientemente alta para dar suporte a estrutura do ciclone através da energia térmica e da humidade, igual ou superior a 26.5ºC e em uma camada com profundidade na ordem de 50m.
- Valores elevados de humidade relativa na média troposfera (700 hPa), níveis médios secos não conduzem ao contínuo desenvolvimento de actividade convectiva em uma vasta área.
- Instabilidade condicional, uma atmosfera que se resfrie rapidamente com a altura para que seja potencialmente instável a convecção húmida, sendo responsável pela libertação do calor armazenado nas águas para o interior do ciclone.

- Distúrbio ciclónico em baixos níveis, os ciclones tropicais não podem desenvolver-se espontaneamente, pois, necessitam de um sistema organizado com rotação considerável e influxos nos baixos níveis. Segundo Reboita 2017, perturbações nos níveis atmosféricos acima da superfície podem causar distúrbios ciclónicos em baixos níveis. Esses distúrbios podem favorecer a convergência dos ventos em superfície que intensificam os fluxos turbulentos de calor latente e sensível do oceano para a atmosfera.
- Fraco cisalhamento vertical do vento horizontal, os valores altos de cisalhamento desfavorecem a formação de ciclones e no caso de um ciclone já formado pode enfraquecê-lo ou ate destruí-lo devido a sua interferência com a organização convectiva em torno do mesmo.
- Local da gênese distante do equador em cerca de 5 a 6°, ou seja, uma distância mínima de pelo menos 500 km da linha do equador onde a força de Coriollis não é desprezível para que se mantenha o centro de baixa do distúrbio.

Para que um ciclone tropical se desenvolva é necessário que num primeiro momento ocorra convergência em baixos níveis, formando as primeiras tempestades (Mathias, 2012). Estas condições dão origem a distúrbios em menores escalas denominados gatilhos de formação de ciclones tropicais e são:

- Ondas de Leste: distúrbio que se propagam de Leste para Oeste na região tropical e por possuírem um padrão de onda no campo de vento em baixos níveis. São caracterizadas por um cavado de pressão à superfície. A Oeste da linha de cavado existe uma região de divergência do vento em superfície, enquanto a Leste existe uma região de convergência, que é favorável à atividade convectiva (Figura 5).
- Frentes frias: ao se deslocarem das regiões baroclínicas de latitudes médias em direção às baixas latitudes criam condições favoráveis para o desenvolvimento de um ciclone tropical, pois levam consigo áreas de convergência à superfície.
- Zona de Convergência Intertropical: ocasionalmente quando a ZCIT está deslocada para longe do equador, uma onda pode se formar dentro de sua área de atuação, a convecção pode se organizar e o sistema evoluir para um ciclone tropical.

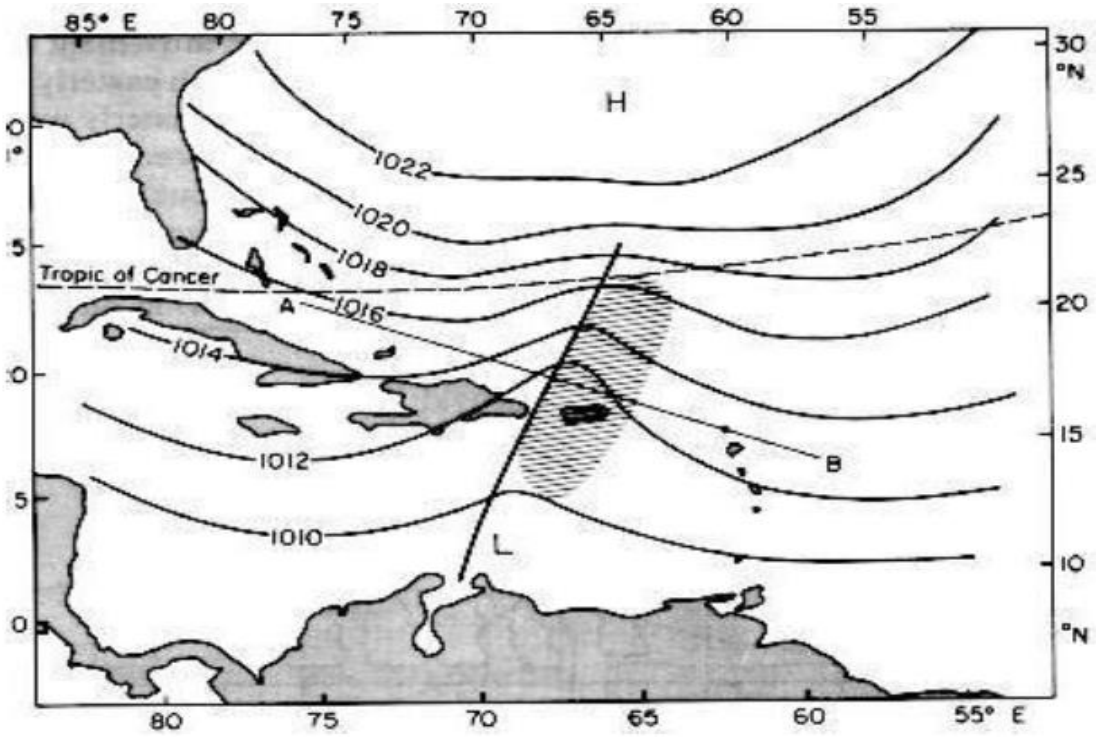

Figura 5: Modelo de uma Onda de Leste. A área pintada indica a região de convergência dos ventos em superfície. Fonte: (Mathias, 2012).

2.3.2 Ciclo de vida dos ciclones tropicais

Segundo Bié, 2022, os CTs possuem distintos ciclos de vida, os que atingem o nível de maturação podem ter o seu ciclo de vida dividido em 4 estágios conforme a figura abaixo:

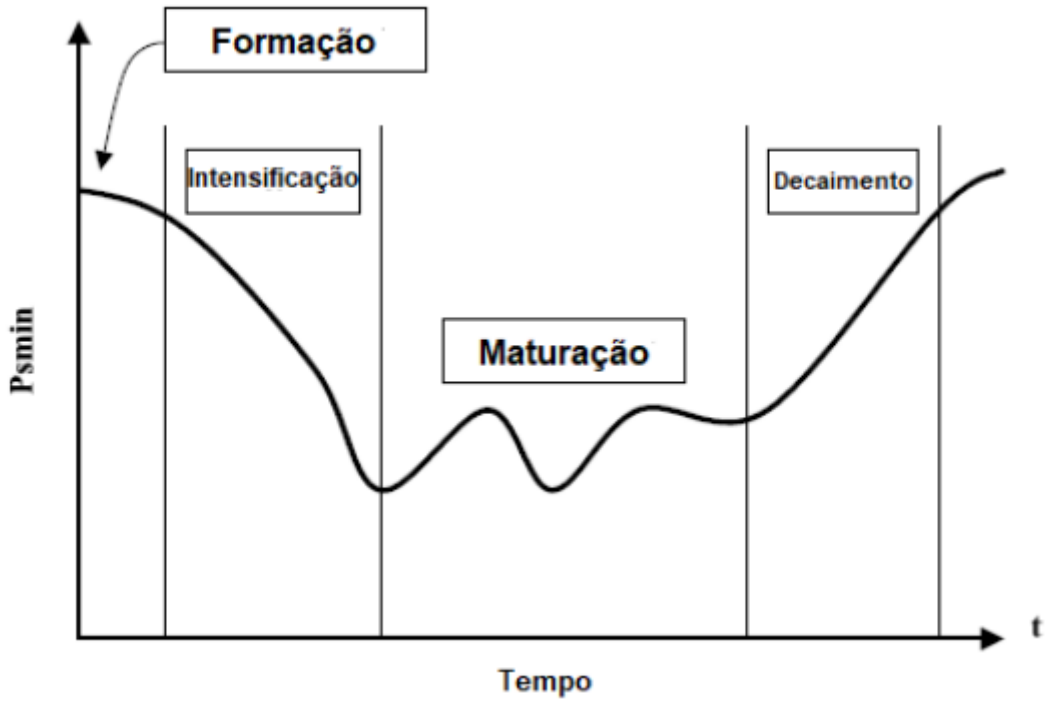

Figura 6: Diagrama esquemático ilustrando o ciclo de vida de um ciclone tropical.

Fonte: Bié 2022.

O ciclo de vida de um ciclone tropical típico inclui os estágios de formação, intensificação, maturação e dissipação (Cavalcante, 2018, e Bié, 2022). Estes estágios estão associados a mudanças na intensidade e estrutura da tempestade. No primeiro estágio, um gatilho é necessário para iniciar a formação; esse gatilho é fornecido por distúrbios incipientes já descritos anteriormente que se organizam e dão início a fase de intensificação do sistema. Nesta fase o sistema se torna auto-sustentado e consegue se manter sem necessitar de uma forçante externa para continuar evoluindo, devido a humidade maior comparativamente ao primeiro estágio. Continuando em condições atmosféricas e oceânicas favoráveis, a intensificação continua levando o sistema ao pico do seu estágio de desenvolvimento, a maturação. Neste estágio em um ciclone tropical mais intenso com estrutura relativamente simétrica e um olho bem definido é discernível, o intenso vórtice se matem pelas elevadas quantidades de energia que extrai do oceano para se sustentar. A fase de decaimento inicia-se quando se desloca para regiões com condições ambientais desfavoráveis, seja porque o sistema desloca-se sobre uma região com baixos valores de TSM, elevados valores de cisalhamento vertical do vento ou quando a penetração continental ocorre, (Bié, 2022).

2.3.3 Desenvolvimento e Intensificação dos ciclones tropicais

Duas teorias são aceitas para explicar o processo de intensificação de ciclones tropicais, uma delas é a *Conditional Instability of Second Kind* (CISK; Ooyama, 1982), relaciona a intensidade do sistema a características da camada limite planetária (especificamente o papel da convergência da massa associada à vorticidade ciclónica na camada de Ekman) enquanto a outra, *Wind-Induced Surface Heart Exchange* (WISHE; Emanuel, 1986) coloca ênfase no desenvolvimento e intensificação do sistema na temperatura da superfície do mar (TSM), particularmente no desequilíbrio termodinâmico entre a superfície do mar e troposfera superior. Em ambas as teorias, o mecanismo principal de geração de energia para o sistema considera o oceano como factor crucial para a manutenção dos sistemas, (Bié, 2022). Uma descrição destas teorias é apresentada de forma breve e resumida em seguida:

A CISK é uma teoria que tenta explicar o desenvolvimento e intensificação de ciclones tropicais, com base nela, a convergência de ar quente e húmido ao longo da camada limite de um ciclone é a fonte de toda a humidade disponível para alimentar a convecção nas paredes do olho do sistema. A condensação do vapor de água devido a intensa convecção liberta calor latente que é posteriormente convertido em energia mecânica que impulsiona a circulação do sistema. Segundo a CISK, a fricção ao longo da camada limite desempenha um papel importante na (i) na desaceleração do vento, causando o desequilíbrio do balanço gradiente (que rege o equilíbrio de forcas em vórtices do tipo ciclone tropical), modificando o ângulo que o vento faz com as isolinhas de pressão, e (ii) induzindo a convergência que é responsável pelo transporte de ar húmido para o centro do sistema ao longo da camada limite, que posteriormente condensa a convecção e fornece energia ao sistema. Assim, para que o sistema continue se intensificando, a geração de energia pela libertação de calor latente deve superar a dissipação de energia pela fricção na camada limite.

Com base nessa teoria, a fricção na camada limite é um importante mecanismo modulador da intensificação destes sistemas, que é dependente de distúrbios pré-existentes.

A WISHE é uma teoria desenvolvida por Emanuel (1986) que baseia seu modelo conceitual a uma analogia ao ciclo de Carnot (Figura 7), onde a energia térmica é convertida em energia mecânica. O ciclo de Carnot é um sistema fechado, no qual a

diferença de temperatura entre camadas provê a energia térmica para colocar o sistema em movimento. De acordo com esta teoria, o ar que converge em direcção ao ciclone é aquecido pelo fluxo de calor sensível proveniente do oceano e também pela fricção que causa a desaceleração do vento na camada limite. Este aquecimento é equilibrado pela expressão adiabática a medida que o ar flui em direção ao centro de baixa pressão e o resfriamento adiabático devido a evaporação (fluxo de calor latente do oceano). A WISHE assume que estes processos estão em equilíbrio e não há, portanto, mudanças de temperatura no ar que flui ao longo da camada limite do sistema. Diferente da CISK, a WISHE não coloca na ênfase convergência friccional na camada limite e sim no desequilíbrio térmico existente entre a troposfera superior e superfície do mar modulada pela TSM. Contudo, assim como na CISK, na WISHE, o desenvolvimento de um sistema em ciclone tropical depende da pré-existência de um distúrbio.

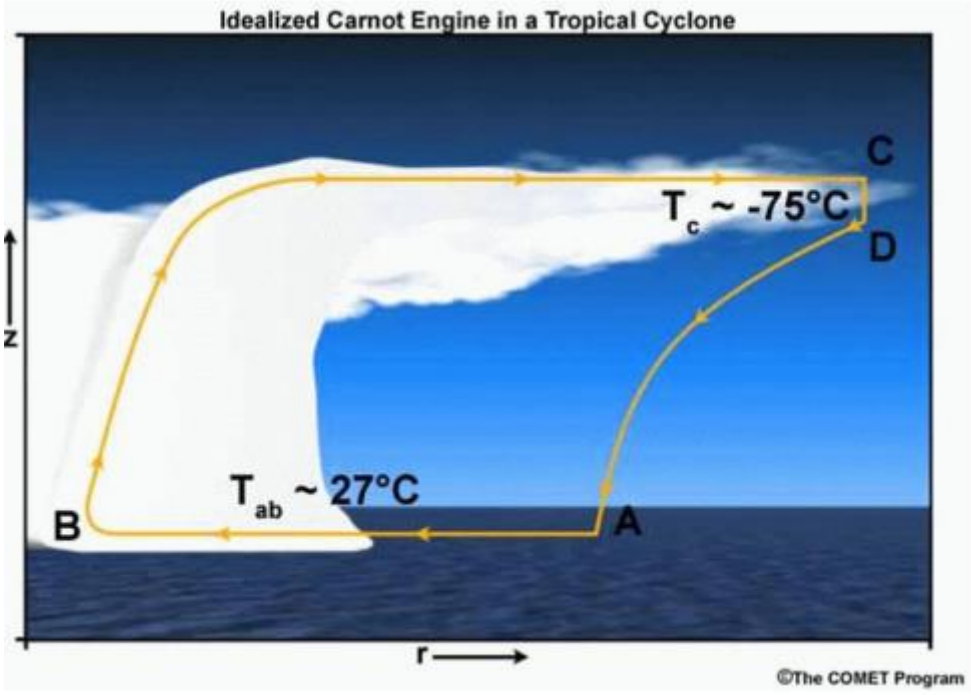

Figura 7: Diagrama esquemático do fluxo de energia térmica em um ciclone tropical idealizado conforme um motor que segue o ciclo de Carnot.

Fonte: (Bié, 2022)

2.3.4 Classificação de Ciclones usada no Sudoeste do Oceano Índico

Os ciclones tropicais são normalmente classificados por sua intensidade, sendo a forma mais comum de medição da velocidade máxima do vento sustentada à superfície (10m) (Cavalcante, 2018) conforme o padrão estabelecido pela Organização Mundial da Meteorologia (WMO, 2018). Por meio desse parâmetro, os ciclones tropicais são classificados como: TD – Tropical Depression (Depressão Tropical); MTS – Moderate Tropical Storm (Tempestade Tropical Moderada); STS – Severe Tropical Storm (Tempestade Tropical Severa); TC – Tropical Cyclone (Ciclone Tropical); ITC – Intense Tropical Cyclone (Ciclone Tropical Intenso); VITC – Very Intense Tropical Cyclone (Ciclone Tropical Muito Intenso) (Bié, 2022), ilustrado na tabela 1.

2.4 Intensidade Potencial Máxima

A Intensidade Potencial Máxima (MPI) representa o valor teórico máximo que um ciclone tropical pode alcançar, com base nas condições termodinâmicas do oceano e da atmosfera. Este conceito, desenvolvido por Emanuel (1995), continua sendo uma das abordagens mais aceitas para estimar a intensidade máxima, usada nos estudos de DeMaria e Kaplan (1994), Zeng et al (2007), Xu et al (2016) entre outros, é amplamente utilizado para estudar a relação entre a temperatura da superfície do mar e a intensidade dos ciclones.

No contexto do Canal de Moçambique, o MPI é uma métrica crucial para entender o potencial de intensificação ciclónica em função das variações da temperatura da superfície do mar, ou seja, a evolução rápida de ciclones tropicais (Menkes et al, 2016). Com o aumento das temperaturas globais devido às mudanças climáticas, espera-se um aumento tanto na intensidade quanto na frequência de ciclones tropicais nas regiões propensas (Knutson T. R. et al, 2020).

Análises recentes dos ciclones tropicais no SWIO mostram uma correlação positiva entre as anomalias de TSM e o aumento da intensidade ciclónica, corroborando o uso do MPI como uma métrica robusta para prever a força desses eventos (Hoarau et al, 2012).

2 Capítulo III – Metodologia

Neste capítulo, é feita a descrição e análise dos materiais e métodos usados para o tratamento de dados para alcançar os objectivos formulados no capítulo I.

3.1 Materiais

Este estudo foi conduzido com base em dados dos ciclones tropicais e da temperatura da superfície do mar (TSM) ocorridos no Sudoeste do Oceano Índico (SWOI) entre as latitudes de 0 e 40˚S e longitude de 30 e 90˚E segundo a delimitação oficial da bacia ciclónica do Oceano Índico Sudoeste monitorada pelo RSMC - La Réunion da Météo-France (WMO, 2018), durante o período de 2013 a 2023 cobrindo assim 10 temporadas ciclónicas, considerando as temporadas ciclónicas que ocorrem entre Novembro e Abril, de acordo com Bié (2022) e Mavume et al. (2009). Ciclones que ocorreram fora desse intervalo foram excluídos da análise, visto que os registos históricos indicam baixa ocorrência de eventos ciclónicos entre maio e outubro (Bié, 2022). Anualmente menos de um ciclone por mês se formou nos demais meses fora da temporada ciclónica (Maio – Outubro) ao longo do SWIO entre 1979 e 2004, este padrão mantém-se até pelo menos o ano 2019 (como se verifica na figura 8). Uma temporada ciclónica abrange dois anos (como descrito anteriormente): inicia em 01 de Novembro de um determinado ano e termina em 30 de Abril do ano seguinte.

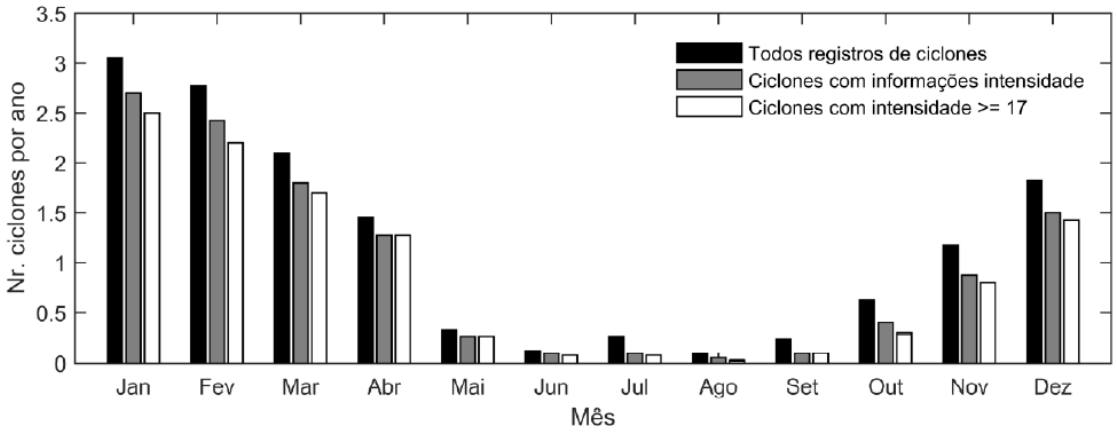

Figura 8: Ciclo anual de ciclones tropicais no SWIO de acordo com os dados do IBTrACS, entre as temporadas de 1980 e 2019.

Fonte: Bié 2022

Estes dados foram obtidos na página oficial do International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive.

As estimativas do vento máximo sustentado (Vmax) dos ciclones feita através das técnicas de Dvorak são originalmente reportadas em nós, porém aqui os dados são convertidos para m/s (1kt = 0,5144m/s). O Vmax corresponde à magnitude do vento máximo observado a 10m acima de uma superfície, conforme o padrão estabelecido pela WMO (WMO, 2017).

As técnicas de consistem em informações fornecidas por imagens de satélite para relacionarem o padrão de distribuição de nuvens e suas temperaturas de brilho com a intensidade dos sistemas (vento máximo sustentado). A pressão mínima é posteriormente estimada a partir de relações empíricas entre o vento máximo sustentado e pressão mínima no centro do sistema. Essas estimativas podem ser refinadas com informações observadas *in-situ*, como dados coletados por voos de reconhecimento e/ou boias (Bié, 2022).

Os CTs possuem diferentes classificações, em função de sua intensidade nas diferentes regiões oceânicas onde eles ocorrem particularmente após atingirem um estágio específico de seu desenvolvimento. A classificação oficial usada no SWIO em função do Vmax (Bié, 2022), está ilustrada na tabela abaixo.

Tabela 1: Classificação de ciclones usada no SWIO de acordo com o Vmax. Significado das siglas (em inglês): TD – Tropical Depression; MTS – Moderate Tropical Storm; STS – Severe Tropical Storm; TC – Tropical Cyclone; ITC – Intense Tropical Cyclone; VITC – Very Intense Tropical Cyclone.

Vmax (m/s)	Classificação SWIO	Sigla
$13,9 \leq Vmax < 17,4$	Depressão Tropical	TD
$17,4 \leq Vmax < 24,6$	Tempestade Tropical Moderada	MTS
$24,6 \leq Vmax < 32,9$	Tempestade Tropical Severa	STS
$32,9 \leq Vmax < 46,3$	Ciclone Tropical	TC
$46,3 \leq Vmax < 59,6$	Ciclone Tropical Intenso	ITC
$Vmax \geq 59,6$	Ciclone Tropical Muito Intenso	VITC

Neste trabalho os sistemas de interesse variam de Vmax ≥ 32,9 a Vmax ≥ 59,6, ou seja, de TC a VITC. Pois estes são os que causam maior dano ao longo da costa de Moçambique.

Também serão verificados dados da temperatura da superfície do mar durante a temporada de ciclones no período determinado anteriormente, a partir das análises globais da TSM do ERA5 (ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present (copernicus.eu)) que é a quinta geração do modelo de previsão ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) com dados disponíveis desde 1940. Os dados do ERA5 são a combinação de dados de observação e conjunto de dados consistentes usando as leis da física e o método de previsão numérica numa grelha de 0,25º (aproximadamente igual a 25km).

3.2 Métodos

3.2.1. Análise da Temperatura da Superfície do Mar e Actividade Ciclónica

A presente análise tem como objectivo avaliar a variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) durante as temporadas ciclónicas no sudoeste do Oceano Índico (SWIO) durante as temporadas ciclónicas em estudo.

Para a construção da série temporal, foram extraídas as médias sazonais da TSM para cada temporada ciclónica. As médias apresentadas correspondem ao valor médio da TSM ao longo de toda a área de estudo em cada temporada, representando, portanto, uma visão integrada da variabilidade térmica superfície do mar.

Para compreender a relação entre a TSM e a actividade ciclónica no sudoeste do Oceano Índico foi elaborado um mapa de distribuição espacial da TSM média juntamente com as trajetórias dos ciclones tropicais ocorridos no período em estudo. Os valores foram representados em um gradiente de cores, indo de temperaturas mais baixas (azul) a mais elevadas (vermelho-escuro), com destaque para a zona tropical onde predominam valores acima de 27 °C, condição típica de ambientes favoráveis à formação de ciclones tropicais. Foram indicadas três informações principais ao longo das trajetórias: o ponto de formação (em verde), o ponto de máxima velocidade do vento (em azul) e o ponto de dissipação ou última posição registada (em amarelo). Essa codificação visual permite identificar as fases de desenvolvimento e dissipação dos sistemas ao longo da bacia.

Para essa etapa, foram utilizadas bibliotecas como xarray, numpy, matplotlib e cartopy, que permitiram identificar padrões geográficos de aquecimento e resfriamento, assim como a ocorrência e intensidade da actividade ciclónica.

A opção por um período de 10 anos, em vez da climatologia padrão de 30 anos (como 1981–2010 ou 1991–2020), justifica-se pelo foco na identificação de variações interanuais recentes, especialmente no contexto das alterações climáticas mais atuais. Além disso, o uso de climatologias de curto prazo é uma prática adoptada em estudos regionais com escopo temporal limitado ou para avaliar mudanças em escalas de décadas (Zhang et al., 2019; WMO, 2022).

3.2.2 Análise da Intensidade

Para investigar a variabilidade interanual da intensidade dos ciclones tropicais que actuaram no SWIO no período de 2013/2014 a 2022/2023, adoptou-se o procedimento descrito por Bié (2022) para análise da variabilidade interanual da duração de ciclones, adaptado aqui para avaliar especificamente a distribuição de intensidade ao longo das temporadas.

Primeiramente, cada ciclone foi atribuído à sua respectiva temporada ciclónica com base na data de gênese do sistema. Em seguida, coletaram-se, para cada ciclone, os valores de velocidade máxima sustentada do vento (max_ws) (IBTrACS). Para cada temporada, efectuou-se a contagem de sistemas em cada categoria, construindo-se um DataFrame em que as colunas eram temporada, número total de TC e categoria (Tabela 2). A agregação foi realizada com o pandas, garantindo a contabilização correta mesmo quando certas categorias não ocorriam em determinada temporada.

Tabela 2: DataFrame usado para a análise interanual da intensidade dos ciclones no SWIO de 2013 a 2023.

	season	total_TCs	STS	TC	ITC	VITC
0	2013/2014	10	3	2	3	2
1	2014/2015	11	4	2	3	2
2	2015/2016	6	3	0	2	1
3	2016/2017	4	0	2	1	1
4	2017/2018	13	6	5	1	1
5	2018/2019	14	2	3	9	0
6	2019/2020	8	1	4	2	1
7	2020/2021	13	8	3	0	2
8	2021/2022	5	3	1	1	0
9	2022/2023	3	0	0	2	1

O gráfico resultante é um diagrama de barras empilhadas, em que cada barra vertical representa uma temporada e é segmentada pelas quatro categorias, dispostas na seguinte ordem (de baixo para cima): azul – STS, branco – TC, cinzento – ITC e preto – VITC.

Para a construção gráfica, empregou-se o matplotlib.pyplot.bar() em modo stacked, definindo o parâmetro bottom progressivamente para acumular as alturas das sub-barras. Assim, a altura total de cada barra corresponde ao número total de ciclones naquela temporada, enquanto a extensão de cada cor evidencia a contribuição de cada categoria.

Este método, conforme aplicado em Bié (2022), permite visualizar simultaneamente a variabilidade interanual no número total de sistemas e na fração de cada nível de intensidade, possibilitando correlações com variáveis climáticas (caso seja requisitado).

3.2.3 Análise Estatística da Relação entre a TSM e a Intensidade dos Ciclones

Fez-se uma matriz de correlação (Heatmap) e de dispersão (Pairplot) que relaciona a intensidade máxima de cada ciclone e a TSM no período em estudo. A intensidade foi representada pela velocidade máxima sustentada do vento (Vmax) dos sistemas, expressa em metros por segundo (m/s), conforme o padrão da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2017). Para isso, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) representada pela fórmula 1, que mede a associação linear entre duas variáveis contínuas (Rumsey, 2016).

Fórmula 1:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})\,(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde:

x_i = valor da TSM na i-ésima temporada

y_i = valor da intensidade média dos ciclones na i-ésima temporada

$\bar{x}$ = média da TSM

$\bar{y}$ = média da intensidade

r = coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente *r* varia entre -1 e +1, e sua interpretação é a seguinte:

- r > 0: correlação positiva (TSM aumenta → intensidade aumenta);
- r < 0: correlação negativa (TSM aumenta → intensidade diminui);
- r ≈ 0: ausência de correlação linear.

Inicialmente, os dados foram organizados num novo DataFrame contendo as seguintes variáveis para cada ciclone tropical ocorrido entre 2013 e 2023 no sudoeste do Oceano Índico: nome do ciclone, temperatura da superfície do mar no momento da gênese (sst_at_genesis), temperatura da superfície do mar no momento da intensidade máxima (sst_at_max_ws), velocidade máxima sustentada do vento (max_ws) e data da gênese do ciclone (utilizada para identificar a temporada correspondente). Esta organização permitiu análises mais detalhadas a nível individual de cada ciclone, em vez de médias agregadas por temporada.

A partir do DataFrame descrito, foi construída uma matriz de correlação de Pearson entre as variáveis: sst_at_genesis, sst_at_max_ws e max_ws.

O objectivo foi verificar a existência de uma relação linear entre as temperaturas da superfície do mar (no momento da gênese e da máxima intensidade) e a intensidade final dos ciclones tropicais. A matriz foi representada visualmente através de um heatmap, utilizando a biblioteca seaborn, e os coeficientes de correlação foram obtidos com pandas.corr().

Para complementar a análise estatística e visualizar a forma da relação entre as variáveis, foi construída uma matriz de dispersão (pairplot), evidenciando a dispersão dos dados e

as distribuições marginais de cada variável. Essa análise ajudou a identificar padrões, possíveis tendências não lineares e a presença de outliers que podem afetar a correlação.

3.2.4 Análise da Relação entre a TSM e a MPI dos Ciclones

Vários estudos anteriores estabeleceram relações empíricas entre a TSM e a MPI para os CTs do Atlântico Norte (DeMaria e Kaplan 1994; Zeng et al. 2007, 2008; Xu et al. 2016), com base em diferentes conjuntos de dados e TSM de períodos diferentes. Segundo Xu et al. 2016, DeMaria e Kaplan (1994) usaram dados climatológicos mensais médios de TSM e dados de TC durante 1962-1992, Zeng et al.(2007, 2008) usaram dados de TSM semanais grosseiros de resolução (1º x 1º) para CT durante 1981-2003 e Xu et al. 2016 usaram dados de TSM de resolução de 0.25º x 0.25º para CT durante 1988-2014.

Para avaliar a relação entre a TSM e a MPI dos ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico, realizou-se um ajuste de regressão polinomial para os dados do Oceano Índico (linha preta contínua) durante o período em estudo, comparando este ajuste com as curvas propostas pelos autores sobre o Atlântico Norte, DeMaria & Kaplan (1994) – linha verde tracejada, Zeng et al. (2007) – linha azul tracejada e Xu et al. (2016) – linha vermelha tracejada. As curvas comparativas referentes ao Atlântico Norte foram incluídas para avaliar se os padrões encontrados naquela região se mantêm válidos para o sudoeste do Oceano Índico.

A MPI empírica em função a TSM se ajusta à intensidade máxima através da função exponencial, fornecida pela formula abaixo:

Fórmula 2:

$$V_{MPI} = A + B \cdot e^{C(TSM - T_0)}$$

Onde:

V_{IPM} - é a intensidade potencial máxima do ciclone, ou seja, a velocidade máxima teórica dos ventos que o ciclone pode atingir (em m/s).

A - é uma constante de ajuste relacionada à conversão de calor a partir da superfície do mar para a atmosfera no ciclo do ciclone tropical. Ele representa a eficiência com que o calor e a humidade são transferidos para alimentar a tempestade.

B - está associado à sensibilidade da intensidade do ciclone à diferença de temperatura entre a superfície do mar (TSM) e a tropopausa (T_0). Ele controla a resposta do ciclone ao aumento da diferença de temperatura entre essas duas camadas.

C - constante de escala que ajusta o quanto a diferença entre a TSM e T_0 impacta a intensidade potencial. A magnitude de C determina o quão sensível o ciclone é a essa diferença de temperatura.

Foram testadas duas abordagens:

1. Ajuste livre dos parâmetros A, B, C e T_0, ou seja, os parâmetros não foram definidos com base em literatura ou teoria, mas usando o ajuste de regressão não linear, o método de mínimos quadrados. A=0.00m/s, B=83.85m/s, C=0.048/ºC e T_0=27.83°C.
2. Ajuste com T_0=30°C fixo, como proposto por Xu et al. (2016), ajustando apenas A, B e C. Para DeMaria e Kaplan (1994) as constantes correspondem: A=28.2 m/s, B=55.8m/s e C=0.1813/ºC; para Zeng et al. (2008) as constantes correspondem: A=29.5 m/s, B=64.6 m/s e C=0.1813/ºC e para Xu et al. (2016) as constantes correspondem: A=27.58 m/s, B=74.03m/s e C=0.1903/ºC.

4 Capítulo IV – Resultados e discussão

4.1 Padrões Temporais e Espaciais da TSM e da Actividade Ciclónica no SWIO

- **Interpretação da série de TSM ao longo das temporadas**

A série temporal das médias de TSM no SWIO ao longo de dez temporadas ciclónicas apresenta variações interanuais significativas, oscilando entre aproximadamente 25,22°C e 25,78°C (Figura 9). Não se observou uma tendência clara de aquecimento ou resfriamento contínuo ao longo do período analisado. Em vez disso, o comportamento da TSM é marcado por flutuações relacionadas a fenômenos climáticos de escala regional e global.

O maior valor observado ocorreu na temporada de 2015/2016, atingindo aproximadamente 25,78°C. Este pico pode ser atribuído à ocorrência de um forte evento de El Niño no mesmo período, que é conhecido por modificar os padrões de circulação atmosférica e aquecer amplamente as águas de diferentes bacias oceânicas, inclusive o Oceano Índico. Em contrapartida, a menor média registada foi na temporada de 2017/2018 (cerca de 25,22°C), possivelmente associada à influência de um evento de La Niña, que tende a resfriar as águas superficiais em diversas regiões tropicais.

Outro destaque é o aumento da TSM na temporada de 2018/2019 (aproximadamente 25,61°C), sugerindo uma recuperação térmica após o resfriamento observado em 2017/2018. A partir de 2019/2020, a TSM mostra relativa estabilidade, com pequenas variações interanuais que giram em torno de 25,3°C a 25,4°C.

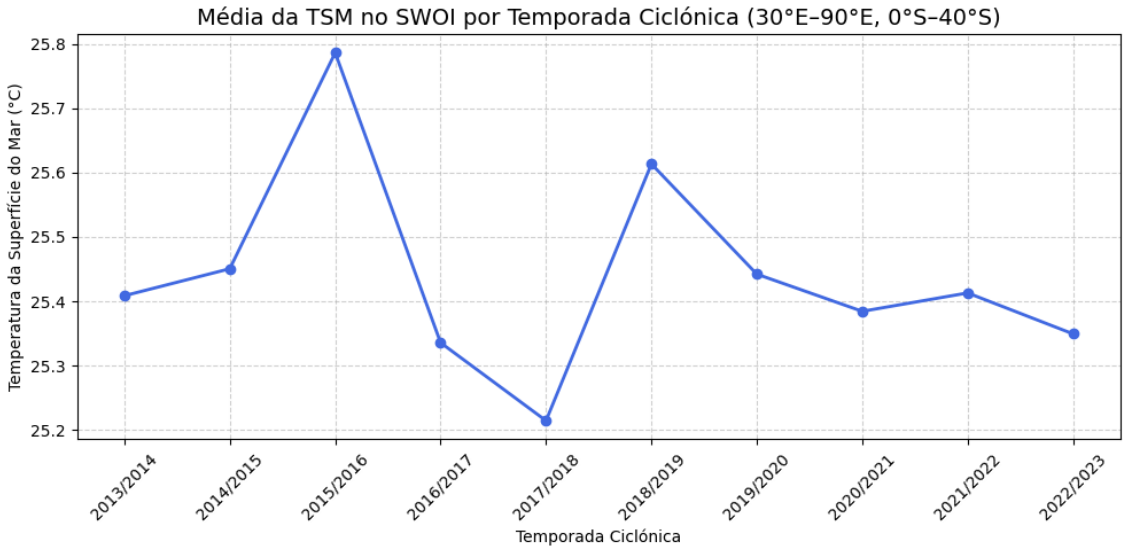

Figura 9: Série temporal da TSM durante a temporada ciclónica do período em estudo.

Do ponto de vista climatológico, é importante destacar que a TSM média da região permanece abaixo do limiar crítico de 26,5°C, comumente considerado necessário para o desenvolvimento de ciclones tropicais, esse comportamento pode ser atribuído à vasta extensão do SWIO, que abrange áreas de latitudes mais baixas (40° Sul).

- **Análise da distribuição espacial da Temperatura da Superfície do Mar**

O mapa obtido evidencia uma estreita correlação entre a distribuição espacial da TSM e as trajetórias dos ciclones tropicais no sudoeste do Oceano Índico (Figura 10). A formação e o desenvolvimento dos sistemas ciclónicos concentram-se maioritariamente

nas latitudes tropicais entre 5°S e 20°S, onde os valores médios de TSM são superiores a 27 °C. Esta condição térmica está amplamente de acordo com a literatura, que define 26,5 °C como o limiar mínimo necessário para a formação de ciclones tropicais (Gray, 1968) (Emanuel, 2003).

A maioria dos pontos de gênese (indicados em verde) localiza-se nas águas ao norte de Madagascar e a leste das Ilhas Mascarenhas, que historicamente correspondem às áreas mais activas para o desenvolvimento ciclónico no SWIO (Fitzpatrick, 1997). Nessas regiões, os altos valores de TSM fornecem energia térmica suficiente para alimentar convecções profundas, intensificadas pela humidade e pelo baixo cisalhamento do vento. Os pontos de máxima intensidade (em azul) também se concentram em zonas com TSM elevada, embora alguns ciclones atinjam seu pico ao se moverem em direção ao sul, em regiões com águas ligeiramente mais frias. Este comportamento está relacionado à persistência de condições dinâmicas favoráveis, como divergência em altos níveis e estruturação vertical bem definida, que podem compensar parcialmente a redução térmica (Khandler & Singh, 2017). Já os pontos finais das trajetórias (em amarelo) se distribuem maioritariamente ao sul de 25°S, onde a TSM média é inferior a 26 °C. Essa região actua como uma barreira térmica natural à intensificação dos ciclones, promovendo seu enfraquecimento ou dissipação. Esse padrão reforça o papel da TSM não apenas na formação, mas também na manutenção dos ciclones tropicais (Camargo et al., 2007) (Emanuel A. , 2005).

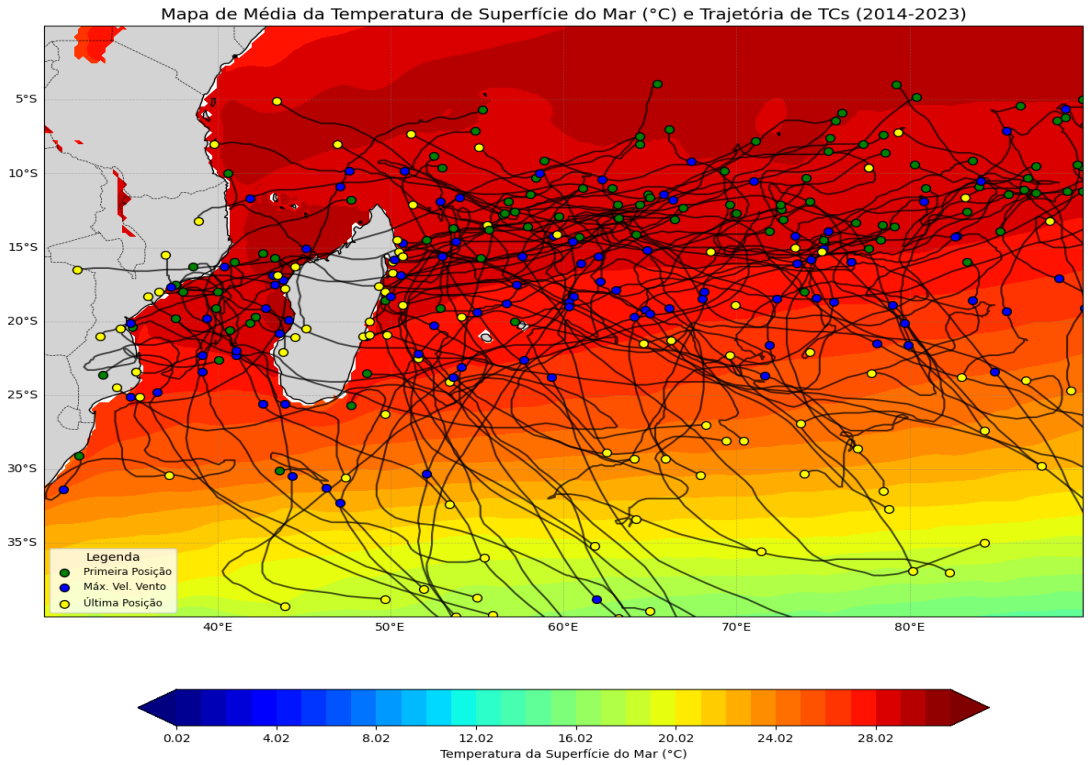

Figura 10: Distribuição espacial da temperatura da superfície do mar em cada temporada ciclónica, a partir de 2013-2014 a 2022-2023.

Os resultados observados neste mapa corroboram o que já foi estabelecido pela climatologia dos ciclones tropicais no SWIO, a existência de um forte controle oceânico sobre a actividade ciclónica, especialmente associado ao padrão espacial da TSM. A alta densidade de trajetórias em áreas específicas e sua associação com águas quentes reforçam a relevância do aquecimento superfície do oceano como um dos principais factores moduladores da actividade ciclónica na bacia.

4.2 Variabilidade Interanual da Intensidade dos Ciclones Tropicais

Na figura abaixo, observa-se um crescimento progressivo no número de STS (pintado a azul) desde 2013/2014, passando de 3 sistemas para um máximo de 8 em 2020/2021, seguido de declínio nas duas temporadas subsequentes. A frequência de TCs (pintado a branco) varia entre 0 e 5 por temporada, atingindo pico de 5 em 2017/2018. Destaca-se a temporada 2018/19, com 9 ITCs (pintado a cinzento) e os VITCs (pintado a preto) são raros, ocorrendo em geral 0 e 2 por temporada.

De modo geral, durante o período em estudo, verifica-se que os sistemas de menor intensidade foram os mais frequentes, com um total de 30 STSs, seguidos por 24 ITCs, 22 TCs e apenas 11 VITCs. Esta distribuição reforça a ideia de que, embora o SWIO seja uma região propensa à formação ciclónica, a maioria dos sistemas não alcança níveis de intensidade extremamente elevados (Camargo et al., 2007).

Não se observa uma tendência clara de aumento ou diminuição da intensidade ao longo dos anos nas categorias TC, ITC e VITC, indicando que a variabilidade interanual da intensidade dos ciclones tropicais nesta região é fortemente modulada por múltiplos factores ambientais. A excepção é a categoria STS, que apresentou uma tendência de crescimento até 2020/2021.

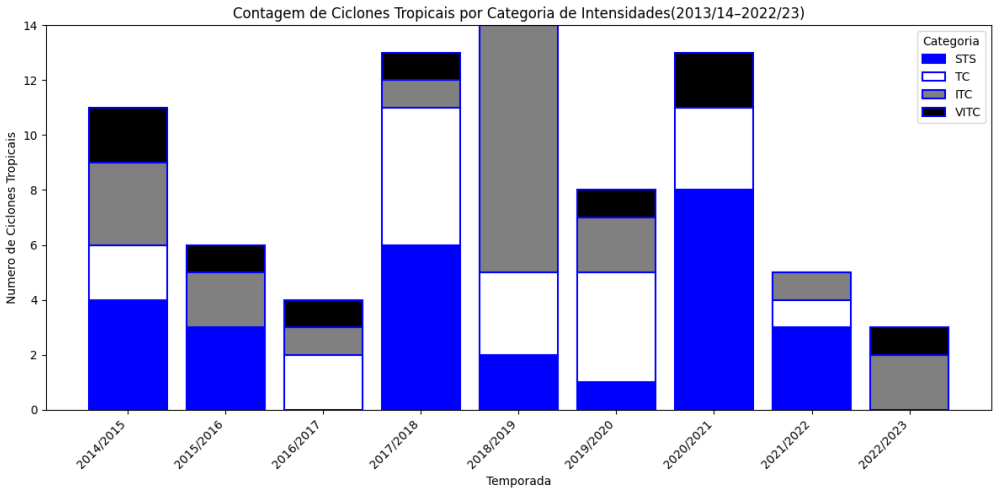

Figura 11: Variabilidade interanual de ciclones tropicais no SWIO discriminada pela intensidade dos sistemas.

Em conjunto, o perfil evidencia que, embora o número total de ciclones varie significativamente de um ano para outro, a proporção de sistemas intensos (ITC e VITC) permanece relativamente estável e baixa, confirmando que a TSM, por si só, não é factor único determinante para eventos de intensidade extrema. Esses resultados corroboram achados prévios sobre a complexidade da intensificação ciclónica (Emanuel A. , 2005).

A presente abordagem metodológica, inspirada em Bié (2022), demonstrou ser eficaz para identificar padrões de intensidade ao longo do tempo no SWIO, ao quantificar a frequência de ocorrência por categoria. Embora originalmente aplicada para avaliar a variabilidade interanual da ocorrência ciclónica, sua adaptação para a análise da

intensidade permitiu uma visão abrangente sobre a evolução das características dos sistemas tropicais da região ao longo da última década.

4.3 Relação entre TSM e Intensidade dos Ciclones Tropicais

A matriz de correlação (Figura 12) indica uma correlação moderada positiva entre a TSM no momento da gênese e no momento de máxima intensidade dos ciclones (r = 0,55), sugerindo que regiões com águas mais quentes no início do desenvolvimento ciclónico tendem a manter temperaturas elevadas até o pico da intensidade do sistema.

Contudo, a correlação entre TSM (tanto na gênese quanto no máximo) e a velocidade máxima sustentada do vento dos ciclones é fraca (r = 0.084 entre sst_at_genesis e max_ws e r = 0.251 entre sst_at_max_ws e max_ws). Esses valores sugerem que, apesar da TSM ser uma condição necessária para o desenvolvimento ciclónico, ela não é suficiente, por si só, para explicar a intensidade máxima alcançada pelos ciclones. Factores como cisalhamento vertical do vento, humidade relativa da troposfera média e instabilidade atmosférica também influenciam fortemente a intensificação dos sistemas (Emanuel, 2005).

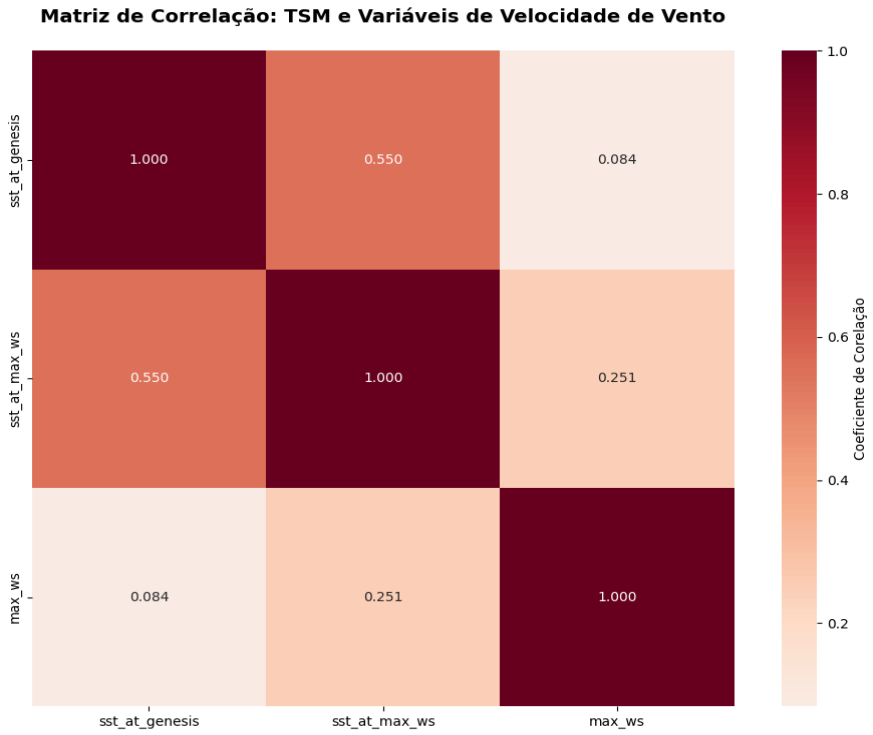

Figura 12: Matriz de correlação entre TSM e a velocidade máxima sustentada do vento dos ciclones.

A matriz de dispersão da Figura 13 reforça essa interpretação ao permitir uma análise visual detalhada das relações entre a temperatura da superfície do mar e a intensidade máxima dos ciclones tropicais. Observa-se que a distribuição dos pontos não mostra uma tendência linear clara entre TSM tanto na gênese quanto na fase de máxima intensidade e a velocidade máxima do vento (max_ws). A maioria dos ciclones apresenta TSM entre 300 K e 303 K, enquanto a intensidade máxima varia significativamente dentro desse intervalo, o que sugere uma alta dispersão dos dados. Essa variabilidade pode ser explicada pela complexidade dos processos físicos que influenciam a intensificação ciclónica, incluindo a interação entre o oceano e a atmosfera, estruturas internas do ciclone e factores inibidores.

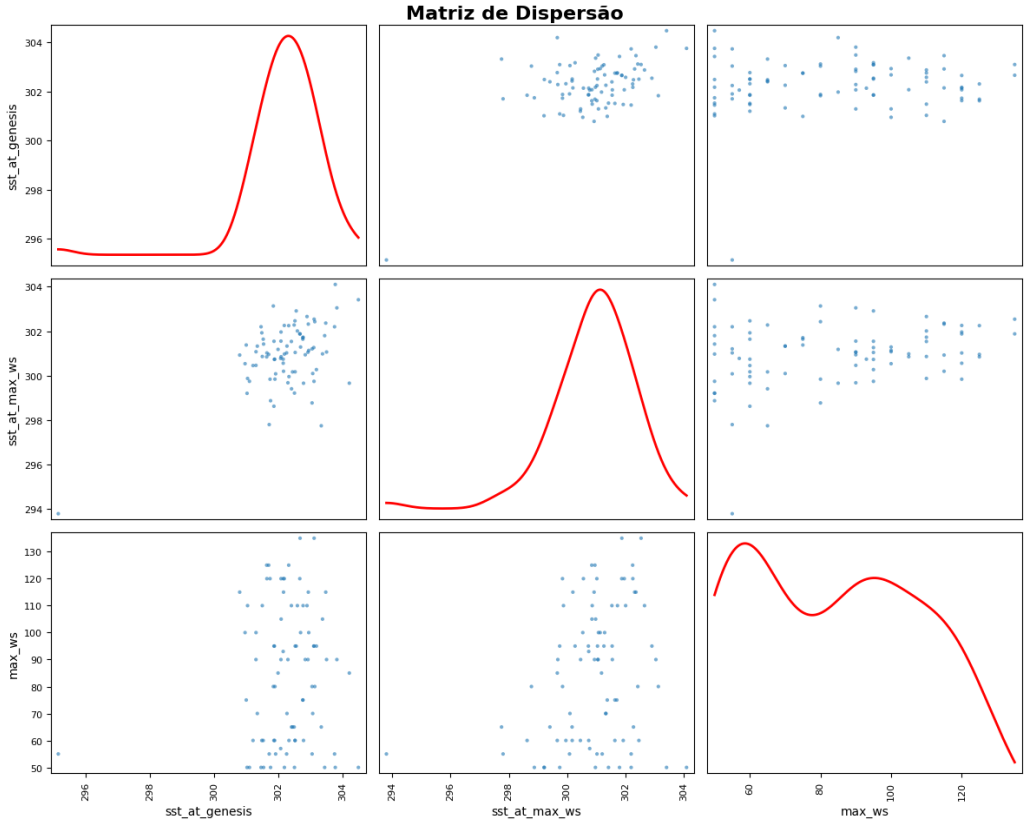

Figura 13: Matriz de dispersão entre TSM e a velocidade máxima sustentada do vento dos ciclones

Na diagonal principal da matriz de dispersão, destacam-se curvas vermelhas que representam a função densidade de probabilidade estimada (KDE - Kernel Density Estimation) para cada uma das variáveis analisadas. Essas curvas substituem os tradicionais histogramas e indicam como os dados estão distribuídos. A semelhança entre

as curvas de sst_at_genesis (canto superior esquerdo) e sst_at_max_ws (centro da diagonal) sugere que os ciclones geralmente se desenvolvem e atingem sua intensidade máxima em ambientes oceânicos com características térmicas semelhantes, o que é consistente com o padrão espacial da TSM no SWIO. Já a curva correspondente à variável max_ws (canto inferior direito) apresenta um comportamento distinto: observa-se uma distribuição multimodal, com dois picos principais de frequência. Isso indica que os ciclones do período analisado se agruparam em dois grupos principais de intensidade, um com valores de max_ws entre aproximadamente 32,9 e 46,2m/s, e outro entre 46,3 e 59,6m/s. Esse padrão pode refletir a coexistência de diferentes categorias de intensidade ciclónica no conjunto de dados (por exemplo, TC ITC), sendo também influenciado por variabilidade atmosférica e oceânica interanual.

4.4 Relação MPI (Vmax) e TSM no Oceano Índico

A Figura 14 mostra o diagrama de dispersão de intensidade em termos de velocidade máxima sustentada do vento (Vmax) em relação a TSM para todos os casos de ciclones durante 2013-2023 no SWIO com o mesmo algoritmo usado no Atlântico Norte pelos autores anteriormente citados. Observa-se uma tendência positiva não linear entre SST e Vmax, ou seja, quanto maior a TSM, maior a intensidade máxima potencial dos ciclones.

O ajuste polinomial específico para o Índico (linha preta) situa-se acima das curvas teóricas para o Atlântico (vermelha, azul e verde), principalmente entre 20 °C e 28 °C, o que indica uma possível maior eficiência termodinâmica dos ciclones no sudoeste do Índico; ou a influência de outras variáveis locais, como baixos níveis de cisalhamento ou maior calor oceânico.

Acima de 27 °C, os valores de Vmax observados ultrapassam 90kt (46,3m/s) classificado como ITC, chegando alguns a ultrapassar 120kt (61,7m/s) classificado como VITC, valor significativamente superior ao previsto pelas curvas teóricas, evidenciando a limitação das parametrizações atlânticas para a região do Índico.

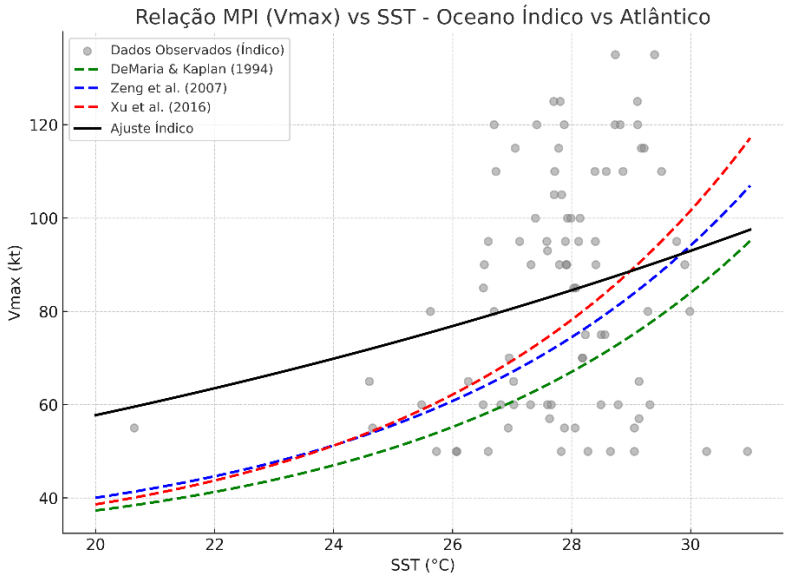

Figura 14: Diagrama de dispersão de intensidade em relação a TSM para todos os casos de TC no SWIO durante 2013-2023. A intensidade ajustada neste estudo (preta) é comparada com a intensidade ajustada com outros autores do Atlântico Norte.

5 Capítulo V – Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusão

A análise espacial dos ciclones tropicais no sudoeste do Oceano Índico revelou que a sua gênese ocorre, predominantemente, entre as latitudes de 5° a 20°S, em regiões onde a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) ultrapassa os 27,9 °C. Estes valores situam-se acima do limiar de 26,5 °C geralmente aceito como mínimo necessário para a formação desses sistemas, confirmando a importância da TSM como condição essencial para a génese dos ciclones.

No entanto, a análise temporal da TSM durante o período de 2013 a 2023 não indicou uma tendência clara de aquecimento ou resfriamento contínuo. O comportamento da TSM mostrou-se altamente variável, influenciado por fenômenos climáticos de escala regional e global, como oscilações tropicais e variações interanuais.

Do ponto de vista estatístico, a correlação entre a TSM e a intensidade máxima dos ciclones foi fraca, tanto na fase de gênese ($r \approx 0{,}08$) quanto na fase de máxima intensidade ($r \approx 0{,}25$). Isso demonstra que, embora a TSM seja uma condição necessária para o desenvolvimento ciclónico, ela não é suficiente, por si só, para explicar a intensidade final alcançada por esses sistemas. Factores atmosféricos adicionais, como o cisalhamento vertical do vento, a humidade da troposfera média e a estrutura interna do ciclone, desempenham um papel significativo na intensificação, em concordância com estudos como os de DeMaria & Kaplan (1994) e Frank & Ritchie (2001).

Complementarmente, a análise da relação entre a TSM e a intensidade máxima potencial (MPI), com base na metodologia de Xu et al. (2016), indicou uma tendência positiva e não linear entre SST e Vmax no sudoeste do Índico. O ajuste polinomial realizado com os dados regionais situou-se acima das curvas teóricas desenvolvidas para o Atlântico Norte, sugerindo uma possível maior eficiência termodinâmica dos ciclones nesta bacia, ou ainda a influência de factores oceanográficos locais, como maior calor oceânico ou menores níveis de cisalhamento. Observou-se que, acima de 27 °C, vários sistemas atingiram velocidades superiores a 90 kt (46,3 m/s), e alguns ultrapassaram os 120 kt (61,7 m/s), indicando categorias de ciclones intensos (ITC) e muito intensos (VITC), valores superiores aos estimados pelas parametrizações do Atlântico Norte.

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que a hipótese inicial, de que o aumento da TSM contribui significativamente para o aumento da intensidade dos ciclones tropicais, foi parcialmente rejeitada. A TSM, embora fundamental para a formação ciclónica, não se mostrou um fator isolado suficientemente forte para explicar a variabilidade na intensidade observada. O desempenho superior do ajuste de MPI específico para o Índico reforça a necessidade de parametrizações regionais mais adequadas.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Com base nos resultados e conclusões alcançados neste estudo são feitas as seguintes recomendações:

1. Incorporar variáveis dinâmicas e termodinâmicas adicionais em estudos futuros, como o cisalhamento vertical do vento, a humidade relativa da troposfera média, a instabilidade convectiva e condições atmosféricas de grande escala, de modo a melhorar a compreensão e previsão da intensificação ciclónica na região, dado que a TSM, isoladamente, não se mostrou um preditor forte da intensidade dos sistemas.
2. Estender o período de análise para séries temporais mais longas, superiores a 20 ou 30 anos, de modo a permitir uma avaliação mais robusta da tendência da TSM e da sua possível relação com a variabilidade interdecadal ou com fenômenos climáticos de maior escala.

6 Referências Bibliográficas

1. Anacleto, D. (30 de Abril de 2019). *Noticias.* Obtido de Dez coisas que devia saber sobre ciclones.

2. Bhatia, K. T. et al. (2018). Projected response of tropical cyclone intensity and intensification in a global climate model. *Journal of Climate*.

3. Bié, A. J. (2022). *Ciclones Tropicais no Sudoeste do Oceano Indico: representaçao em reanálises atmosféricas e experimentos de sensibilidade com modelo regionaal acoplado.* Sao Paulo.

4. Brito, R. J. (2003). *Aplicacao do Modelo Regional de Mesoscala MM5 no Estudo do Ciclone Tropical Hudah de Abril de 2000.* Maputo.

5. Camargo et al., S. J. (2007). Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis. *Journal of Climate*.

6. Cavalcante, L. C. (2018). *Influencia dos Ciclones Tropicais na Formacao dos Fenomenos Adversos no Nordeste Brasileiro entre 2013 e 2015.* Maceió.

7. Chauque, A. J. (2019). *Análise da influência do ciclone Idai sobre a circulação das correntes, temperatura superficial do mar, salinidade superficial e distribuição da clorofila no canal de Moçambique.* Quelimane.

8. Chikozho, D., Rouault, M., & Ndarana, T. (2022). Tropical cyclone genesis and intensification in the South-West Indian Ocean: Environmental conditions and trends. *Journal of Climate*.

9. DeMaria, M., & Kaplan, J. (1994). A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Weather and Forecasting*.

10. Dias, M. C. (19 de Marco de 2018). Aquecimento Global: Causas e Consequencias. *Paskim*, 1.

11. Emanuel. (2003). Tropical cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31.

12. Emanuel, A. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 686-688.

13. Emanuel, A. K. (1995). The Behavior of a Simple Hurricane Model Using a Convective Scheme Based on Subcloud Layer Entropy Equilibrium. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 3960-3968.

14. Emanuel, K. (2005). *Divine Wind: The History and Science of Hurricanes.* Oxford University Press.

15. Emanuel, K. A. (1986). An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *Journal of the Atmospheric Sciences*.

16. Emanuel, K. A. (1988). The maximum intensity of hurricanes. *Journal of the Atmospheric Sciences*.

17. Evans, J. L., Camargo, S. J., & Fogarty, C. (2020). The impact of sea surface temperature on tropical cyclone intensity. *Nature Reviews Earth & Environment*.

18. Falvey, R. S. (2019). *Annual Tropical Cyclone Report.*

19. Fitzpatrick, P. J. (1997). *Understanding and Forecasting Tropical Cyclone Intensity Change.* Department of Meteorology, Florida State University.

20. Frank, W. M., & Ritchie, E. A. (2001). Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure. *Monthly Weather Review*.

21. Gray, W. M. (1968). Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*.

22. Hermes, J. C., & Reason, C. J. (2009). Variability of the Agulhas Current system and its impact on regional climate. *Journal of Climate*, 22(4).

23. Hoarau et al. (2012). Changes in Intensity and Frequency of Tropical Cyclones in the South-West Indian Ocean. *Meteorological Applications*.

24. Hoguane, A. M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada* , 69-82.

25. INAM, Instituto Nacional de Meteorologia –. (2022). *Relatório do Estado do Clima de Moçambique 2022.* Maputo.

26. IPCC. (2021). Sixth Assessment Report: Climate Change 2021. *The Physical Science Basis*.

27. Jilong, C., & et al, c. (2020). Impacts of climate change on tropical cyclones and induced storm surges in the Pearl River Delta region using pseudo-global-lwarming method. *Scientific Reports: nauresearch*.

28. Johnson, N. C. (04 de September de 2023). Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. *nature climate change*, 26.

29. José, F. (Julho de 21 de 2020). *Extensão territorial e característica da costa Moçambicana.* Obtido de Escola Virtual.

30. Jury, M. R., & Matyas, C. J. (2022). Climate–weather interactions modulating tropical cyclones over the Mascarene Islands 2000–2024. *Meteorology and Atmospheric*.

31. Khandler, R., & Singh, O. P. (2017). Role of sea surface temperature in the intensification of cyclonic disturbances over the Indian Ocean. *MAUSAM*.

32. Knutson T. R. et al. (2020). Tropical cyclones and climate change assessment: Part I. Detection and attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*.

33. Kuleshov, Y. F. (2009). Trends in tropical cyclones in the South Indian Ocean and the South Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*.

34. Lavender, S. L. (9 de March de 2018). The influence of sea surface temperature on the intensity and associated storm surge of tropical cyclone Yasi: a sensitivity study. *Natural Hazards and Earth System Science*.

35. Leroux M D et al. (2018). The Influence of ENSO on Cyclone Intensity in the South-West Indian Ocean. *Climate Dynamics*, 2147-2166.

36. Mathias, R. d. (2012). *Analise e Classificacao de Ciclones Utilizando Diagramas de Fase: Conceitos e Aplicacao em Previsao de Tempo Operacional.* Rio de Janeiro.

37. Matimbe, L. A. (2004). *Frequencia de Ciclones Tropicais em Mocambique e a sua Relacao com a Precipitacao.* Maputo.

38. Mavume, A., & et al, c. (2009). *Climatology and Landfall of Tropical Cyclones in the SouthWest Indian Ocean.*

39. Menkes et al. (2016). Impact of climate change on tropical cyclones in the southwest Pacific. *Nature Climate Change*.

40. Météo-France La Réunion. (2022). *Bilan de la saison cyclonique 2021-2022 dans le sud-ouest de l'océan Indien.* https://www.meteofrance.re.

41. Muthige, M., Crétat, J., e Reason, C. J. C. (2001). Atypical tropical cyclone activity in the southwest Indian Ocean during the 2018–2019 season. *Climate Dynamics*, 56.

42. Raunet, M. (1997). *Climat des régions tropicales de l'Océan Indien.* ORSTOM Éditions.

43. Rebelo, M. S. (2020). *Exposição, Vulnerabilidade e Risco aos Perigos Naturais em Moçambique: o caso dos ciclones tropicais no Município de Angoche.* Lisboa.

44. Reboita, M. S., Gan, M. A., & Rocha, R. P. (2017). *Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais.* São Paulo.

45. Rumsey, D. J. (2016). *Statistics For Dummies.* (2nd, Ed.) Wiley.

46. Santos, E. F. (2019). *Temperatura da Superfície dos Oceanos sob a Perspectiva da Teoria das Matrizes Aleatórias.* Pernambuco.

47. Stull R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology.* Kluwer: Academic Publishers.

48. Thomas, A., & et al. (06 de Novembro de 2017). Tropical Cyclones: Impacts, the link to Climate Change and Adaptation. *Briefing note*.

49. WMO – World Meteorological Organization. (2022). *State of the Global Climate 2022.*

50. WMO. (2018). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2017.*

51. Xie et al., P. (2009). Interannual variability of the tropical cyclone formation over the southwest Indian Ocean. *Climate Dynamics*, 33.

52. Xu J. et al. (2016). *The Relationship between Sea Surface Temperature and Maximum Intensification Rate of Tropical Cyclones in the North Atlantic.* China.

53. Ynoue, R. Y. (2009). *Circulacao Geral da Atmosfera.* Univesp.

54. Zhang, R. et al. (2019). Estimates of Decadal Climate Predictability From an Interactive Ensemble Model. *Geophysical Research Letters*.