UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia

Interacção da pluma do Rio Zambeze com os ciclones tropicais durante a aterrissagem na Costa de Moçambique

Autor:

Wilder João Niquice Muchanga

UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia

Interacção da pluma do Rio Zambeze com os ciclones tropicais durante a aterrissagem na Costa de Moçambique

Autor

Wilder João N. Muchanga

(Wilder João Niquice Muchanga)

Supervisor

(Professor Fialho Paloge J. Nehama)

Avaliador

(Professor Avelino A. A. Langa)

Presidente de Júri

(Mestre Banito Bene Magestade)

Quelimane, Novembro de 2024

Dedicatória

Dedico o presente trabalho:

Á minha Família e em especial

Á memória da minha querida avó, ***Maria Helena Massicume***. Ela, que tanto anseava em testemunhar o momento em que seu neto se formaria, permanece viva em minha memória e coração. Este trabalho é uma homenagem a ela, cujo amor e apoio foram fontes inestimáveis de inspiração ao longo desta jornada acadêmica. Que sua presença espiritual continue a guiar os meus passos.

Agradecimentos

Este trabalho é resultado de um esforço colectivo, e quero aproveitar a oportunidade para expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada.

Em primeiro lugar, ao Todo-Poderoso, por guiar meus passos e me conceder força nos momentos desafiadores ao longo deste percurso acadêmico.

Á minha família em geral, e em especial os meus pais Vasco N. B. Muchanga e Catarina A. Vilanculo, um agradecimento sincero e profundo pelo amor, cuidado, apoio constante, ensinamentos e conselhos que serviram como insentivo para essa jornada.

Ao meu supervisor Fialho P. J. Nehama, pela orientação sábia, paciência e tempo disponibilizado. Meu muito obrigado por tornar possível a concretização deste trabalho.

Ao corpo docente da ESCMC, pelas valiosas contribuições para o meu desenvolvimento acadêmico.

Á minha parceira e cúmplice, pelo amor e apoio incondicional durante a longa caminhada académica. Sou imensamente grato por tê-la ao meu lado.

Aos colegas e amigos, em particular a turma de Oceanografia 2020 e a família Pro-Articles, cujas interações e conselhos foram fontes de inspiração, agradeço pela camaradagem ao longo desses anos. E

a todos que contribuíram directa ou indirectamente nessa jornada.

Meu Muito Obrigado!

Declaração de honra

Eu Wilder João Niquice Muchanga, declaro, sob compromisso de honra, que esta monografia nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau e que ela constitui resultado original do meu esforço individual. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia, da Universidade Eduardo Mondlane.

Quelimane, Novembro de 2024

Assinatura

(Wilder João Niquice Muchanga)

Resumo

No presente estudo analisou-se a interacção entre a pluma do Rio Zambeze com os ciclones tropicais durante a aterrissagem na Costa de Moçambique, com o principal objectivo de compreender o impacto da pluma do Rio Zambeze nos ciclones tropicais que aterrissam em Moçambique. O estudo foi realizado no Canal de Moçambique e foram utilizados dados de salinidade e temperatura da superfície do mar, assim como dados históricos de eventos ciclónicos, com destaque para trajectória e velocidade de vento, dos últimos 16 anos, de 2008 a 2023. A delimitação da pluma do Rio Zambeze foi mediante o cálculo da anomalia de salinidade. Os resultados indicam que dos 229 eventos ciclónicos formados no Sudoeste do Oceano Índico, 41 entraram no Canal e 17 aterrissaram na costa de Moçambique. A distribuição sazonal destaca o período de Janeiro á Março como de maior aterrissagem de eventos na costa moçambicana, apresentando a região centro do país como a preferencial para aterrissagem dos eventos ciclónicos. As coincidências entre os períodos de maior extensão da pluma e de maior actividade ciclónica mostra que a pluma do Rio Zambeze pode influenciar tais preferências. A análise da temperatura da superfície do mar mostrou respostas distintas dentro e fora da área da pluma. Pontos fora da pluma experimentaram rápida diminuição, enquanto nos pontos dentro, a camada de barreira induzida pela pluma proporcionou alta resistência a diminuição da temperatura da superfície do mar. A análise da interacção da pluma do Rio Zambeze com os ciclones tropicais que aterrissaram na costa moçambicana mostrou que os ciclones tropicais aumentam de intensidade ao interagirem com a pluma. Os resultados mostram ainda existência de uma relação linear alta e directamente proporcional entre a anomalia de salinidade e a intensidade dos ciclones que passam da região, com o coeficiente de correlação de aproximadamente 0.85, evidenciando o contributo significativo da pluma do Rio Zambeze na variação da intensidade dos ciclones tropicais que aterrissam na costa de moçambique.

Palavras-chaves: Ciclones tropicais, Pluma do Rio Zambeze, Costa de Moçambique

Lista de figuras

Figura 1: Representação esquemática do ciclo de vida de um ciclone tropical (Fonte: Bié, 2022), onde Psmin significa pressão mínima da superfície central. 6

Figura 2: Estrutura de um ciclone tropical (Fonte: Mathias, 2012). 7

Figura 3: Diagrama explicativo do CISK: (a) Diante da presença de um ciclone incipiente de baixo nível com uma camada limite húmida, a convergência friccional de humidade e a ascensão forçada impulsionam a convecção; (b) O aquecimento latente gerado pela convecção reduz a pressão superficial, fortalece o ciclone de baixo nível e intensifica a convergência de humidade, desencadeando um ciclo de feedback positivo (Fonte: WMO, 2017). 8

Figura 4: Esquema do fluxo de energia térmica em um ciclone tropical idealizado, semelhante a um motor de Carnot. O ar na camada limite atmosférica flui isotermicamente (AB), eleva-se adiabaticamente na convecção do olho da parede (BC), diverge isotermicamente próximo à tropopausa no anticiclone de escoamento (CD). Para completar o circuito, este ar deve afundar longe da tempestade (DA) (Fonte: WMO, 2017). 9

Figura 5: Esboço de 9 regiões nas costas leste e oeste de Madagáscar e Moçambique, indicando as preferidas regiões de aterrissagem dos 64 ciclones tropicais. Círculos vermelhos indicam as principais áreas de incidência (Fonte: Mavume et al. 2009). 12

Figura 6: Área de estudo, com destaque da região central do Banco de Sofala, evidenciado pelo retângulo vermelho a tracejado. 13

Figura 7: Trajectórias dos Eventos ciclónicos no SWIO ao longo da série temporal de 2008-2023. Linhas verdes representam eventos registados no Canal de Moçambique e vermelhas, os que aterrissaram na costa de Moçambique. 18

Figura 8: Número de Eventos ciclónicos registado no Canal de Moçambique ao longo da série temporal. 19

Figura 9: Número de Eventos ciclónicos com aterrissagem na costa de Moçambique. 20

Figura 10: Região de aterrissagem dos eventos ciclónicos ao longo da costa moçambicana. 22

Figura 11: Extensão média da pluma do Rio Zambeze e trajectória dos Ciclones Idai e Eloise, com destaque dos pontos de controle A, B, C e D. 23

Figura 12: Flutuações da TSM durante a passagem dos ciclones tropicais nos pontos de controle A, B, C e D. O asterix indica o dia de passagem do ciclone tropical no ponto, linhas continuas indicam a TSM e as tracejadas a variação da TSM em função de tempo. 25

Figura 13: Trajectória e intensidade dos ciclones tropicais sem interação com pluma. Kenneth (figura a e b) e Dineo (c e d), destacando o limite da pluma do Rio Zambeze (linha preta). As figuras b e d são realce ou zoom das áreas sob retângulo vermelho nas figuras a e c, respectivamente. 27
Figura 14: Trajectória e intensidade dos Ciclones Idai (a e b) e Eloise (c e d) durante a interacção com a pluma do Rio Zambeze, destacando o limite da pluma (linha preta). As figuras b e d são realce ou zoom das áreas sob retângulo vermelho nas figuras a e c, respectivamente. 28
Figura 15: Relação entre a anomalia de salinidade e a intensidade dos ciclones tropicais durante a interação com a pluma do Rio Zambeze. 29
Figura 16: Extensão média da Pluma do Rio Zambeze nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março. 42

Lista de tabelas

Tabela 1: Escala de ciclones tropicais de Saffir-Simpson. Adaptado de Saffir, (1974). 7
Tabela 2: Resumo da descrição dos dados usados. 15
Tabela 3: Distribuição dos Eventos ciclónicos em categoria e meses (Novembro – Abril) no Canal de Moçambique e os que aterrissaram na Costa de Moçambique ao longo da série temporal 2008-2023.. 21

Lista de abreviaturas

CISK – Conditional Instability of Second Kind

CMEMS – Copernicus Marine Environment Monitoring Service

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA5 – European Reanalysis Atmosferic

GLORYS – Global Ocean Reanalysis and Simulation

IBTrACS – International Best Track Archive for Climate Stewardship

MATLAB – Laboratório de Matrizes

NetCDF– Network Comand Data Form

SSM – Salinidade Superficial do Mar

SWIO – Sudoeste do Oceano Índico

TSM – Temperatura Superficial do Mar

WISHE – Wind-Induced Surface Heat Exchange

Índice

Dedicatória I

Agradecimentos II

Declaração de honra III

Resumo IV

Lista de figuras V

Lista de abreviaturas VII

1. Introdução 1

1.1. Contextualização 1

1.2. Problematização 2

1.3. Justificativa 3

1.4. Objectivos 3

1.4.1. Geral 3

1.4.2. Específicos 3

2. Revisão de literatura 4

2.1. Ciclones tropicais e suas características 4

2.1.1. Definição e formação de ciclones tropicais 4

2.1.2. Ciclo de vida e estrutura de um ciclone tropical 5

2.1.3. Classificação de ciclones tropicais com base na intensidade 7

2.1.4. Desenvolvimento e intensificação dos ciclones tropicais 8

2.2. Interacção atmosfera - oceano 9

2.3. Dinâmica da Pluma do Rio Zambeze 10

2.4. Ciclones tropicais no Canal de Moçambique e na costa moçambicana 11

3. Metodologia 12

3.1. Descrição da área de estudo 12

3.2. Materiais e métodos 13

3.2.1. Materiais 13

3.2.2. Métodos 15

4. Resultados e discussão 18

4.1. Resultados 18

4.1.1. Identificação da região preferencial de aterrissagem dos ciclones tropicais na Costa de Moçambique 18

4.1.2. Delimitação da extensão média da pluma do Rio Zambeze e comparação das flutuações da TSM dentro e fora da pluma durante a aterrissagem dos ciclones tropicais 22

4.1.3. Caracterização da variação da intensidade dos ciclones com e sem interacção com a pluma do Rio Zambeze 25

4.1.4. Relação da intensidade dos ciclones tropicais com a anomalia de salinidade 29

4.2. Discussão 30

5. Conclusões e recomendações 34

5.1. Conclusões 34

5.2. Recomendações 34

6. Referências bibliográficas 35

Anexo 41

1. Introdução

1.1. Contextualização

Vivemos em um mundo cada vez mais impactado pelo aquecimento global, resultado das crescentes emissões de gases do efeito estufa (Silva e Tommaselli, 2007; IPCC, 2023). Esse fenômeno aquece os oceanos (Santos e Otoni, 2013), proporcionando condições propícias para a formação de eventos climáticos extremos, com destaque para os ciclones tropicais, que têm se tornado mais frequentes e intensos (Mavume, *et al*. 2009; IPCC, 2023). Os ciclones tropicais fazem parte dos desastres naturais mais severos, contribuindo significativamente para destruições de infraestruturas, proliferação de doenças e perda de vidas humanas em todo mundo.

Existem vários factores e processos que afectam a temperatura oceânica, dentre estes está a pluma dos rios. Nas regiões influenciadas por plumas de água doce, a salinidade superficial do mar diminui devido à mistura com a água fluvial, podendo resultar em anomalias de salinidade. A presença de água doce, caracterizada por baixa salinidade aumenta a estratificação halina e torna a camada de mistura mais rasa, resultado da formação de uma camada de barreira formada entre a camada de mistura e a termoclina, que restringe a interacção entre elas (Foltz e McPhaden, 2009), e mantém as águas superficiais quentes, fornecendo energia térmica para os ciclones tropicais (Ffield, 2007; Hong *et al*., 2022).

Hernandez *et al.* (2016) mostraram que a pluma dos rios Amazonas e Orinoco tem a capacidade de modular a amplitude da redução da temperatura superficial do mar (TSM) induzida por ciclones tropicais no Atlântico Tropical Ocidental, com as águas da pluma apresentando uma diminuição mais lenta da TSM em comparação ao oceano aberto, onde observou-se uma rápida diminuição da TSM imediatamente após a passagem de ciclones. Newinger (2015) também investigou os efeitos da pluma na estratificação oceânica e intensidade dos ciclones, revelando que a estabilização da coluna de água causada pela presença da pluma aumenta intensidade dos ciclones enquanto a alteração da transmissão solar resulta na diminuição da intensidade dos ciclones.

Altas extensões de pluma de água doce são também observadas ao longo da costa moçambicana, especificamente na região do Banco de Sofala, onde representa local de descarga de vários rios, incluindo Buzi, Púnguè e Zambeze, sendo o Zambeze considerado a principal fonte de água doce da região, contribuindo com cerca de 85% de todo o volume de água doce descarregado na área (Machaieie *et al.*, 2022). De acordo com Nehama (2008) e Machaieie *et al*., (2022), os meses de Janeiro a Março representam o período de maior extensão da pluma do Rio Zambeze, justificado através das altas descargas fluviais nesse período. Os estudos em referência também indicaram que a pluma se mostra

sensível a padrões de vento durante o período. A anomalia de salinidade, portanto, surge como uma métrica essencial para avaliar a interacção entre a pluma e os ciclones tropicais, permitindo observar como variações na salinidade superficial afectam os eventos ciclónicos.

Embora estudos sobre a interacção entre a pluma de rios e os ciclones tropicais já tenham sido realizados, o contributo da pluma do Rio Zambeze permanece pouco explorado. Assim, o presente estudo tem como objectivo preencher tal lacuna, direcionando seu foco para a pluma do Rio Zambeze e sua possível influência nos ciclones tropicais ao aterrissarem na Costa de Moçambique, utilizando a anomalia de salinidade como principal parâmetro para delimitar a pluma e estudar a interacção com os ciclones.

1.2. Problematização

A costa moçambicana, situada no Canal de Moçambique, representa uma das regiões mais vulneráveis a ocorrência de Tempestades e ciclones tropicais a nível de toda costa leste africana, isso, devido à sua localização geográfica e geomorfologia (Bié, 2017). A crescente frequência de eventos climáticos extremos principalmente dos ciclones tropicais intensos impõe um desafio significativo para a segurança e o desenvolvimento sustentável de Moçambique, pois, estes causam danos severos as regiões por onde passam, gerando sobreelevação do nível do mar e marés de tempestades (Chaúque, 2019), sendo responsável pela inundação e destruição de várias zonas costeiras.

De acordo com o estudo realizado por Mavume *et al*. (2009), a frequência dos eventos ciclónico, que inclui tanto tempestades quanto ciclones tropicais, aumentou no Sudoeste do Oceano Índico (SWIO) e os ciclones tornaram-se mais intensos. E nos últimos 16 anos tem-se verificado alta frequência de ciclones tropicais na costa moçambicana, em especial na região centro, região esta que é local de descarga de vários rios, incluindo o Zambeze. A água doce descarregada pelo rio cria uma pluma no oceano que altera a TSM, gerando anomalias positivas da TSM (Ffield, 2007; Vizy and Cook, 2010; Androulidakis *et al*., 2016), na ordem de até 4º C (Ffield, 2007), devido a presença de massas de água de baixa salinidade que impede a mistura vertical na região, criando assim um ambiente propício a intensificação de ciclones (Newinger, 2015; Androulidakis *et al*.; Hernandez *et al*., 2016). No entanto, a interacção entre a pluma do Rio Zambeze e os ciclones tropicais que atingem a costa de Moçambique ainda carece de estudos.

1.3. Justificativa

Diante da falta de estudos específicos sobre a pluma do Rio Zambeze e sua interacção com ciclones tropicais na costa de Moçambique, o presente estudo visa compreender a relação existente entre as duas variáveis.

Compreender a relação existente entre a pluma e os ciclones tropicais é importante para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação, fornecendo informações valiosas para o planejamento e a gestão de desastres na região. Para garantir uma contribuição relevante e atualizada, foi utilizado dados dos últimos 16 anos (2008-2023), com objectivo de identificar tendências e mudanças podem ter ocorrido nas últimas duas décadas. Assim, o presente estudo contribui não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para a tomada de decisão, modelagem e previsão dos ciclones futuros visando garantir a segurança e resiliência da população moçambicana.

1.4. Objectivos

1.4.1. Geral

- Estudar a interacção da pluma do Rio Zambeze com os ciclones tropicais que aterrissaram na Costa de Moçambique de 2008 a 2023.

1.4.2. Específicos

- Identificar a região preferencial de aterrissagem dos ciclones tropicais na Costa de Moçambique;
- Delimitar a extensão média da pluma do Rio Zambeze e comparar as flutuações da TSM dentro e fora da pluma durante a aterrissagem dos ciclones;
- Caracterizar a variação da intensidade dos ciclones com e sem interacção com a pluma e;
- Relacionar a intensidade dos ciclones com a anomalia de salinidade.

2. Revisão de literatura

Os ciclones tropicais são também considerados vórtices atmosféricos e diferem-se dos oceânicos através de meios de formação e propagação. Os oceânicos ocorrem no oceano e para além da força de Coriolis, estes são geralmente formados devido a topografia, ventos e interações entre diferentes correntes oceânicas e são efetivamente transportadores de momentum, massa, calor e características biológicas assim como química a partir do seu ponto origem, influenciando assim na circulação global das massas de água e na biologia dos oceanos (Azevedo e Mata, 2010), enquanto os atmosféricos ocorrem na atmosfera, podendo desenvolver-se tanto sobre o continente assim como sobre os oceanos, sendo umas das causas a instabilidade baroclínica e liberação de calor latente para a atmosfera (Quando, 2012). Contudo, estes dois fenómenos exercem um papel fundamental na regulamentação do clima regional e global.

2.1. Ciclones tropicais e suas características

2.1.1. Definição e formação de ciclones tropicais

Ciclone tropical é um termo atribuído a sistemas meteorológicos de baixa pressão, não frontal, de escala sinótica, com convecção organizada e persistente e centro bem definido com circulação ciclónica fechada e bem definida em superfície (Frank, 1977), possuindo campo de atuação que varia de centenas á milhares de quilómetros (Glitzenhirn, 2015). De acordo com Bié (2022), dependendo do seu local de formação estes podem tomar diferentes designações, sendo Furacões (Atlântico Norte e Pacifico Nordeste), Tufões (Pacifico Noroeste) e ciclones tropicais quando formados em outras bacias oceânicas. Estes diferem-se dos Extratropicais, os ciclones tropicais possuem núcleo quente e são formados em regiões de alta TSM, se formando e mantendo-se em ambientes barotrópicas dependendo da evaporação e liberação de calor latente para sua manutenção enquanto os últimos são formados em latitudes médias, em ambientes baroclínicas associadas ao contraste térmico das massas de ar e possuem núcleo frio (Mathias, 2012).

As maiores ocorrências dos ciclones tropicais são registadas nas regiões tropicais e subtropicais na estação de verão, onde a TSM apresenta-se acima do limiar de 26º C (Palmen, 1948). Para o desenvolvimento dos ciclones tropicais outras condições dinâmicas e termodinâmicas são necessárias, de acordo com Jullien (2013), são elas: Força de Coriolis apreciável para fornecer vorticidade necessária ao sistema em desenvolvimento, fraco cisalhamento vertical do vento e alta humidade atmosférica, além desses, a camada de mistura deve ser relativamente profunda (Gray, 1968). Após a ocorrência ou formação dos ciclones tropicais, para a sua materialização é necessário que algum distúrbio atmosférico

pré-existente ocorra, sendo eles: Ondas Leste, Frentes frias e/ou Zonas de Convergência intertropical (Mathias, 2012).

2.1.2. Ciclo de vida e estrutura de um ciclone tropical

O ciclo de vida de um ciclone tropical compreende quatro estágios principais, conforme ilustrado na Figura 1. Durante esses estágios (formação, intensificação, maturação e dissipação) o ciclone tropical passa por mudanças significativas em sua intensidade e estrutura. A descrição extensiva do Ciclo de vida e estrutura dos ciclones tropicais foi efetuada por Emanuel (2003) e Wang e Wu (2004), a seguir apresenta-se o resumo destas.

No estágio inicial de formação, é necessário um gatilho, geralmente fornecido por distúrbios incipientes, como aqueles originados na zona de convergência intertropical, ondas de leste ou cavados de monção. Se as condições ambientais forem propícias, o distúrbio incipiente se organiza, marcando o início da fase de intensificação. Durante esse estágio, o sistema torna-se auto-sustentável, não dependendo mais de forçantes externas para seu desenvolvimento. Persistindo em condições favoráveis, a intensificação continua, levando o sistema ao auge de seu desenvolvimento, conhecido como estágio de maturação. Nessa fase, um ciclone tropical mais intenso exibe uma estrutura relativamente simétrica, com um olho bem definido, indicando um vórtice intenso que se mantém pela energia significativa extraída do oceano.

O estágio final é o de dissipação, que ocorre quando o ciclone tropical se desloca para regiões com condições ambientais desfavoráveis. Isso pode envolver a movimentação sobre áreas com baixas TSM, alto cisalhamento vertical do vento ou a penetração continental. O declínio do sistema começa nessas condições adversas, marcando o fim do ciclo de vida do ciclone tropical.

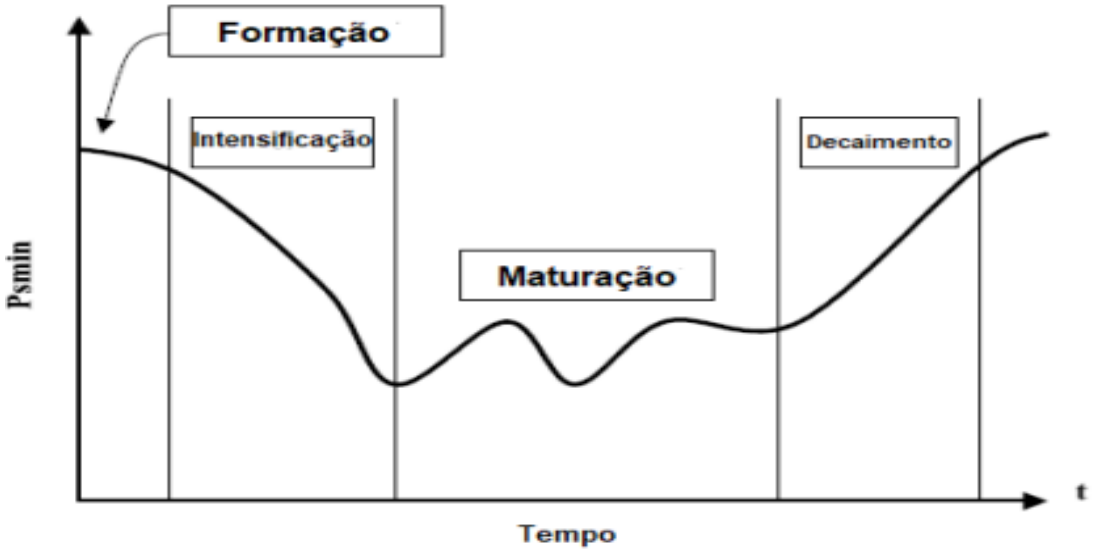

Figura 1: *Representação esquemática do ciclo de vida de um* ciclone tropical *(Fonte: Bié, 2022), onde Psmin significa pressão mínima da superfície central.*

A estrutura de um ciclone tropical abrange um diâmetro de cerca de 550 Km, e é composta por uma área central denominada "Olho", Paredes do olho e Bandas de precipitação (Figura 2). Destacando-se a região do olho que é caracterizada por ventos suaves e pouca cobertura de nuvens (Cardoso 2003; Mathias, 2012). Essa região clara, quase isenta de nuvens, é típica de ciclones tropicais bem desenvolvidos, especialmente aqueles com ventos de intensidade de furacão ou superiores. De acordo com Cardoso (2003), o olho é caraterizado por ser a região de menor pressão superficial e altas Temperaturas, com seu diâmetro variando de 8 á 200 Km. O olho é ainda marcado por uma descida lenta do ar, com a velocidades de 5 a 10 cm/s, podendo ocorrer uma descida mais rápida durante fases de intensificação. Além da parede do olho, o ar também apresenta descida, interrompida por faixas espirais de nuvens cumulonimbus, onde o ar pode ascender a alguns metros por segundo (Emanuel, 2003).

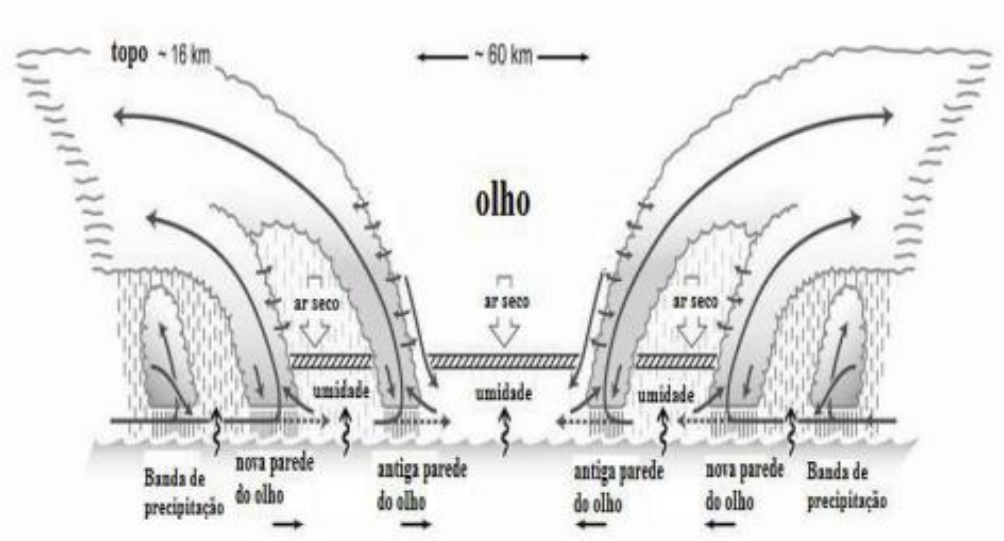

Figura 2: *Estrutura de um* ciclone tropical *(Fonte: Mathias, 2012).*

2.1.3. Classificação de ciclones tropicais com base na intensidade

A classificação de ciclones tropicais é uma ferramenta importante para avaliar a sua intensidade e o potencial impacto nas áreas costeiras. A Escala de ciclones tropicais de Saffir-Simpson apresentada na tabela 1 é uma métrica amplamente reconhecida que utiliza a velocidade do vento como critério principal para atribuir categorias de intensidade. Antes da formação de um ciclone tropical observa-se depressão tropical (TD), quando a velocidade de vento é inferior a 64 Km/h e quando essa velocidade excede os 64 Km/h até o limite de 118 Km/h torna-se tempestade tropical (TS) (Mathias, 2012), e só depois dessa, atingem-se o estágio de ciclone tropical.

Tabela 1: *Escala de ciclones tropicais de Saffir-Simpson. Adaptado de Saffir, (1974).*

Categoria	**Velocidade de Vento**		**Sobrelevação (Pés)**	**Magnitude de danos**
	Km/h	Milhas/hora		
1	119-153	74-95	4-5	Mínimo
2	154-177	96-110	6-8	Moderado
3	178-209	111-130	9-12	Extensivo
4	210-249	131-155	13-18	Extremo
5	>249	156+	18+	Catastrófico

2.1.4. Desenvolvimento e intensificação dos ciclones tropicais

O desenvolvimento e intensificação dos ciclones tropicais são processos complexos e regidos por duas teorias amplamente aceites: a Conditional Instability of Second Kind (CISK) e a Wind-Induced Surface Heat Exchange (WISHE) (WMO, 2017). A seguir apresenta-se o resumo de cada teoria.

A teoria CISK foi proposta por Ooyama (1982), e relaciona a intensidade do ciclone à convergência de ar quente e húmido ao longo da camada limite, sendo a fonte primária de humidade para alimentar a convecção nas paredes do olho do ciclone. A condensação do vapor de água, liberando calor latente, impulsiona a circulação do sistema (Figura 3). A fricção na camada limite, de acordo com a CISK, desempenha um papel importante na desaceleração do vento e na indução da convergência, que transporta ar húmido para o centro do sistema. Para a manutenção da intensificação, a geração de energia pela liberação de calor latente deve superar a dissipação de energia pela fricção.

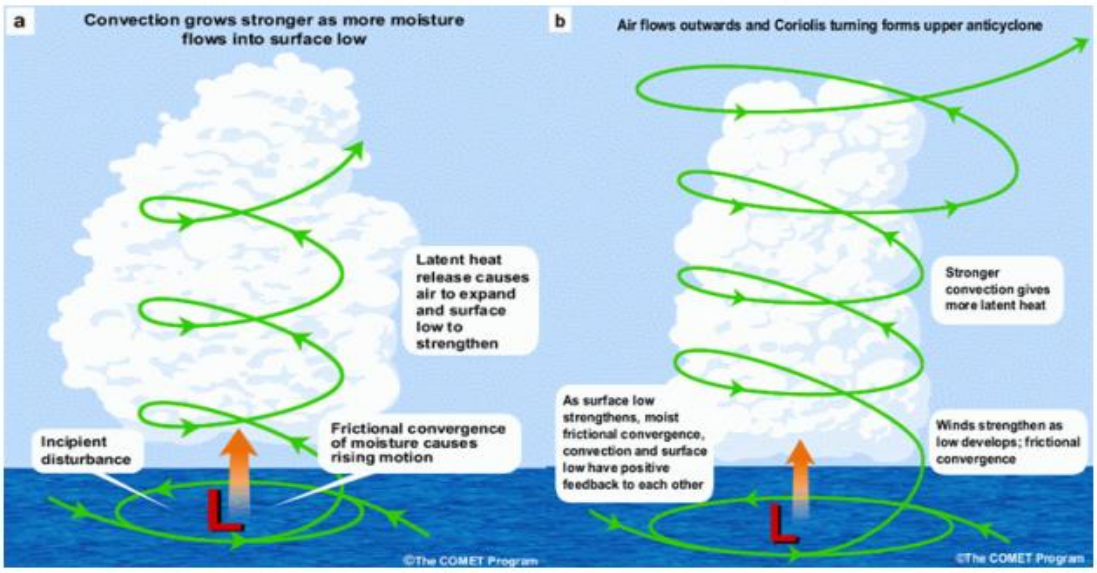

Figura 3: *Diagrama explicativo do CISK: (a) Diante da presença de um ciclone incipiente de baixo nível com uma camada limite húmida, a convergência friccional de humidade e a ascensão forçada impulsionam a convecção; (b) O aquecimento latente gerado pela convecção reduz a pressão superficial, fortalece o ciclone de baixo nível e intensifica a convergência de humidade, desencadeando um ciclo de feedback positivo (Fonte: WMO, 2017).*

A teoria WISHE, desenvolvida por Emanuel (1986), baseia-se em uma analogia ao ciclo de Carnot, onde a energia térmica é convertida em energia mecânica. Nessa teoria, o ar convergente em direção ao ciclone é aquecido pelo fluxo de calor sensível do oceano e pela fricção, equilibrando-se com a expansão adiabática e o resfriamento adiabático devido à evaporação (Figura 4). A WISHE não enfatiza a

convergência friccional na camada limite, mas sim o desequilíbrio térmico entre a troposfera superior e a superfície do mar, modulado pela TSM.

Contudo, ambas as teorias concordam que o desenvolvimento de um ciclone tropical depende da existência prévia de um distúrbio, e o oceano desempenha um papel crucial fornecendo a humidade e a energia necessárias para alimentar esses sistemas.

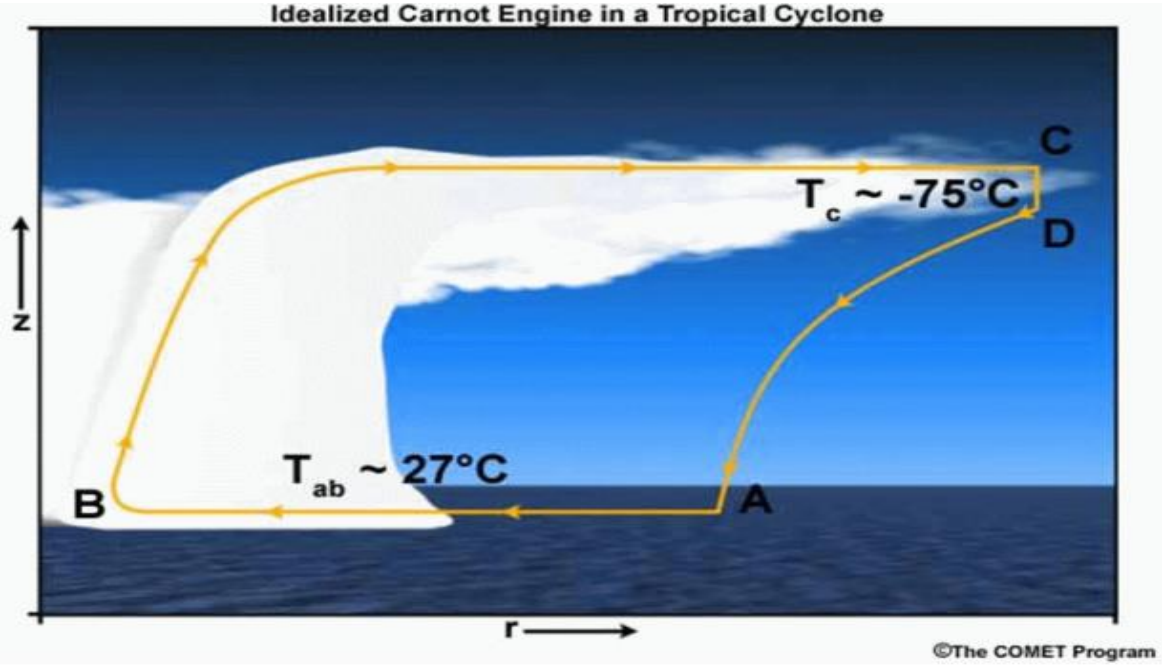

Figura 4: *Esquema do fluxo de energia térmica em um* ciclone tropical *idealizado, semelhante a um motor de Carnot. O ar na camada limite atmosférica flui isotermicamente (AB), eleva-se adiabaticamente na convecção do olho da parede (BC), diverge isotermicamente próximo à tropopausa no anticiclone de escoamento (CD). Para completar o circuito, este ar deve afundar longe da tempestade (DA) (Fonte: WMO, 2017).*

2.2. Interacção atmosfera - oceano

As interações entre a atmosfera e o oceano são fundamentais para o desenvolvimento e intensificação de ciclones tropicais, sendo o oceano a principal fonte de energia para esses sistemas. Ciclones tropicais geralmente se formam sobre águas oceânicas com temperaturas superiores a 27°C, sendo alimentados pelos fluxos de calor latente e, em menor grau, pelo calor sensível (Bié, 2022). O vento intenso associado a esses sistemas interage com o oceano, provocando mudanças na TSM por meio de trocas de calor com a atmosfera, mistura vertical e bombeamento de Ekman (Shay *et al*. 2000). Esses processos atuam no

sentido de reduzir a TSM, desempenhando um papel crucial na modulação da intensidade do ciclone tropical.

Durante a passagem de ciclones, o estresse do vento forte provoca reduções significativas na TSM devido à mistura de água mais fria da termoclina para a camada de mistura (Wang, 2004), podendo apresentar anomalias da TSM frias até 6º C (Lin *et al*, 2003), sendo o resfriamento por mistura vertical o processo dominante, enquanto as perdas evaporativas contribuem em menor escala (Shay *et al*. 2000). A redução da TSM pode resultar na diminuição do fluxo de entalpia do oceano para a atmosfera, resultando na diminuição da intensidade do ciclone tropical. De acordo com Rudzin *et al*. (2019), a formação de uma camada barreira induzida pela presença de água doce pode suprimir a troca de calor entre a termoclina e a interface atmosfera-oceano, influenciando os fluxos entre atmosfera e o oceano durante a passagem de um ciclone tropical, mantendo a superfície aquecida e proporcionando mais energia térmica ao sistema, tornando-o mais intenso.

A influência das descargas de água doce dos rios nas áreas costeiras desempenha um papel significativo nas interações atmosfera-oceano e no desenvolvimento de ciclones tropicais. Essas descargas introduzem água doce no oceano, impactando a distribuição de salinidade, e consequentemente, as condições oceânicas locais. A produção de pluma resultante das descargas dos rios contribui para o aumento mais acentuado da estratificação da coluna d'água no local de descarga (Buci, 2018), tornando a camada de mistura rasa e originando uma camada da barreira entre a água quente da superfície e a fria abaixo da termoclina (Foltz e McPhaden, 2009). A camada de barreira associada à presença da pluma, cria gradientes de salinidade capazes de modificar a estrutura vertical da coluna d'água e as propriedades térmicas, afetando os fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera (Hernandez *et al*., 2016; Yan *et al*., 2017), favorecendo condições para a intensificação de ciclones tropicais (Grodsky *et al*., 2012; Androulidakis *et al*., 2016).

2.3. Dinâmica da Pluma do Rio Zambeze

O Rio Zambeze está localizado na costa leste de África e representa um dos maiores rios do continente, com cerca de 2750 Km de comprimento e largura variando de 200 á 8000 m (Nehama, 2008), apresentando descarga média de 3000 m^3/s (Siddorn *et al*., 2001)**.** O rio tem sua origem em Zâmbia e desagua no Oceano Índico em forma de um Delta, sendo o Delta localizado em Moçambique, particularmente na província da Zambézia, região centro do país. Este desempenha um papel significativo na dinâmica costeira do Canal de Moçambique, especialmente por meio de sua influente pluma, sendo caracterizada por ser altamente dinâmico e estender-se por longas distâncias.

A pluma do rio Zambeze exerce um papel muito importante na economia da população local pois tem o potencial de fornecer um grande aporte de nutrientes que contribui para a alta produtividade pescaria da região (Lutjeharms, 2006). De acordo com os autores Hoguane e Armando (2015), a descarga do rio Zambeze explica 50% das capturas pesqueiras artesanais na região norte do Banco de Sofala, evidenciando a influência significativa do rio nas capturas pesqueiras locais. A além disso, esta pluma influencia a salinidade e temperatura oceânica, afetando a dinâmica costeira da região e consequentemente os ciclones tropicais que passam pela região.

A dinâmica da pluma do Rio Zambeze foi estudada através de observações e modelagem. Segundo Lutjeharms (2006), as descargas de água doce provenientes do Rio Zambeze podem deslocar-se até uma distância de cerca de 50 Km da costa sobre o oceano, podendo ainda se estender até as últimas profundidades da coluna de água, criando plumas que se estendem tanto para o equador quanto para os polos, com uma região de recirculação próxima á foz (Nehama e Reason, 2015). Os padrões de dispersão dessas plumas são predominados pela deflexão de Coriolis (Nehama, 2008). Além disso, estudos como o de Nehama e Reason (2015) destacam a sensibilidade da pluma às condições climáticas, especialmente aos ventos. Realçando que os Ventos northerly e easterly podem causar grandes mudanças na distribuição da pluma, enquanto ventos de brisa do mar levam a uma acumulação de água na região de recirculação.

2.4. Ciclones tropicais no Canal de Moçambique e na costa moçambicana

A ocorrência de ciclones tropicais no Canal de Moçambique e ao longo da costa moçambicana foi investigada em diversos estudos, fornecendo deste modo subsídios valiosos sobre a climatologia, comportamento e influências desses sistemas nessas áreas.

De acordo com Mavume *et al*. (2009), durante o período de 1980-2007, uma média de 12,5 ciclones tropicais por ano foi registrada no SWIO, sendo que 85% deles se formaram entre os meses de novembro e abril, com 50% observado nos meses de janeiro e fevereiro, com uma pequena predominância em março e abril em comparação com novembro e dezembro. Notavelmente, houve um aumento significativo na ocorrência de ciclones intensos, passando de 36 no período de 1980-1993 para 56 no período de 1994-2007. Este aumento coincidiu com um acréscimo de 0,12˚C na temperatura média da superfície do mar ao longo dessas décadas.

A relação entre a ocorrência de eventos ciclónicos e os fenómenos El Niño/La Niña também foi discutida, mostrando maior tendência para a ocorrência de ciclones tropicais intensos nos períodos da La Niña. Dentre os eventos ciclónicos observados ao longo do SWIO pelos autores acima mencionados, 64 atingiram a costa, sendo 16 em Moçambique e 48 em Madagáscar. Por outro lado, no estudo realizado

por Matimbe (2004), houve registo de 76 ciclones observado no Canal de Moçambique, dos quais 35 tiveram impactos diretos na costa ou no interior de Moçambique, ambos estudos mostraram que a região centro do país é a mais predominada por eventos ciclónicos, conforme destacado na figura 5.

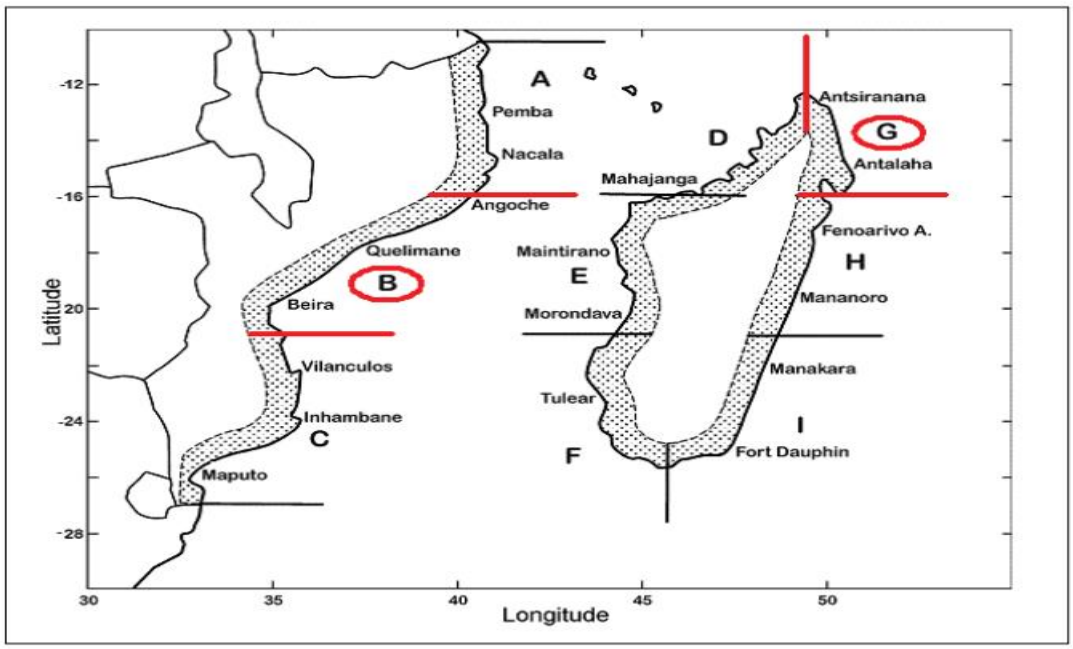

***Figura 5**: Esboço de 9 regiões nas costas leste e oeste de Madagáscar e Moçambique, indicando as preferidas regiões de aterrissagem dos 64 ciclones tropicais. Círculos vermelhos indicam as principais áreas de incidência (Fonte: Mavume et al. 2009).*

3. Metodologia

3.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo no presente traballho é o Canal de Moçambique, focando-se na região central do Banco de Sofala, entre as latitudes 18º 30' a 21º 30' Sul, conforme ilustrado na figura 6. Foi escolhida esta banda de latitudes, por ser fortemente influenciada pelo Rio Zambeze e apresentar maiores extensões da pluma de água doce do rio, conforme ilustrado por Machaieie *et al*., (2022).

O Canal de Moçambique situa-se entre Moçambique e a ilha de Madagáscar, no ocidente do oceano índico (Langa, 2018), sendo limitado a norte pela linha que se estende desde o Estuário do Rio Rovuma, em Moçambique, até ao Cabo-Amber, ponta norte de Madagáscar, entre as latitudes de cerca de 10 a 11º S, respectivamente, e a Sul é delimitado pela linha que se estende desde a Ponta de Ouro (~26º E), a sul de Maputo, Moçambique, até ao Cabo Saint-Marie, extremo sul de Madagáscar (IHO, 1953). De acordo com Piton (1981), o canal possui um comprimento de aproximadamente 1600 Km e a largura variando de 420 a 1000 Km, possuindo profundidades de até 4 Km e uma área superfície de aproximadamente 1,5 $\times 10^6$ Km^2.

O Canal de Moçambique é caraterizado por apresentar clima tropical, com duas estações distintas, sendo os períodos de "Outubro a Março" e "Abril a Setembro" considerados húmido e seco, respectivamente (INAM, 2022). De acordo com Siddorn *et al.* (2001), o Canal de Moçambique apresenta valores de salinidade variando de inferiores a 20 *PSU* na região próxima ao Delta do Zambeze á valores de cerca de 35.5 *PSU* na região do oceano aberto, apresentando ainda águas mais quentes na região costeira, com valores em torno de 30º C, contra os 29º C da região do oceano aberto.

O Canal de Moçambique é também caraterizado por alta actividade de vórtices oceânicos, tanto ciclónicos assim como anticiclónicos, sendo a região norte caraterizada por apresentar vórtices anticiclónicos próximos a Costa de Moçambique com diâmetro médio de 100 Km enquanto a região centro caraterizada por apresentar vórtices dos dois tipos e com maior energia cinética devido aos seus altos diâmetros, com o valor médio de 300 Km (Halo *et al.,* 2014).

O Banco de Sofala é caraterizada por possuir uma plataforma rasa, extensa e altamente rica em recursos pesqueiros, possuindo cerca de 50 000 Km^2 de área. Esta região representa a plataforma mais extensa do país (Nhaca, 2015) e de toda costa leste africana (Machaieie, 2022) e apresenta uma profundidade de máxima de 75 m (Nhaca, 2015). Vários rios desaguam nessa região, incluindo Buzi, Púngoé e Zambeze, sendo o Zambeze considerado a principal fonte de água doce da região, com o contributo de cerca de 85% de todo volume de água doce descarregada na região (Machaieie, 2022).

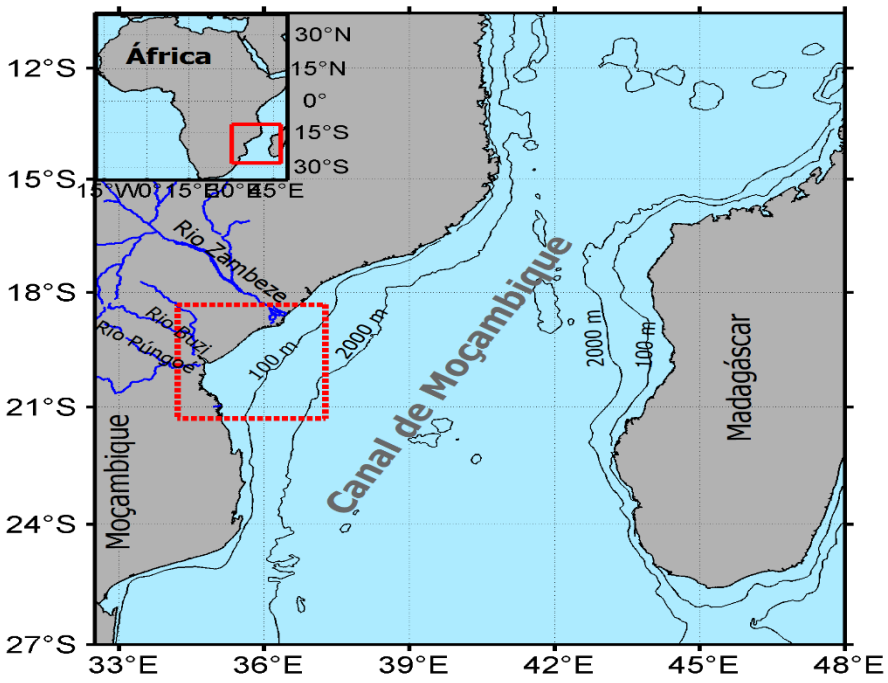

Figura 6: *Área de estudo, com destaque da região central do Banco de Sofala, evidenciado pelo retângulo vermelho a tracejado.*

3.2. Materiais e métodos

3.2.1. Materiais

Para a realização e alcance dos objectivos do presente estudo utilizou-se dados históricos de eventos ciclónicos, com destaque para a trajectória e velocidade de vento dos ciclones tropicais, dados de temperatura da superfície do mar (TSM), e salinidade superficial do mar (SSM), que são descritos a seguir, com o resumo apresentado na tabela 2:

a. Dado histórico de Eventos Ciclónicos

O levantamento dos dados históricos dos eventos ciclónicos foi efetuado na base de dados da International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), na sua quarta versão e encontrando-se disponível no site: https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive. São dados horários, registados de três em três horas e possuindo uma resolução espacial de 0.1º (~10 Km) (IBTrACS, 2019).

Os dados foram baixados no formato shapefile, contendo informações robustas sobre os eventos ciclónicos registados ao longo do SWIO, desde o trajecto de cada ciclone, velocidades de vento até as distâncias para aterrissagem, abrangendo um período de 1848 a 2023. No entanto, optou-se por focar nos últimos 16 anos, de 2008 a 2023, por vários motivos. Primeiramente, estudos anteriores, como o de

Mavume *et al.* (2009), já exploraram extensivamente os padrões de eventos ciclônicos em décadas anteriores, abordando características gerais dos ciclones nessa região. Portanto, a análise recente oferece uma contribuição mais atualizada e relevante, ao identificar mudanças e tendências que podem ter ocorrido nas últimas duas décadas. O período de 2008 a 2023 inclui também alguns dos ciclones mais intensos e destrutivos da história recente, como os ciclones Idai e Kenneth, que tiveram impactos significativos nas áreas costeiras e nas populações locais. Dentro do período, escolheram-se especificamente os Ciclones Idai e Eloise para as análises devido à sua interacção significativa com a pluma do Rio Zambeze.

Os dados foram processados no programa ArcGIS (versão 10.1), efetuando-se concretamente a produção do mapa de trajectória dos eventos ciclónicos ao longo do SWIO, destacando os registados no Canal de Moçambique e os que aterrissaram na costa de Moçambique ao longo dos 16 anos. Fez-se de seguida a exportação dos dados para o programa Microsoft Excel para as análises estatísticas. Os dados foram organizados levando em conta o período de formação e aterrissagem, velocidade máxima de vento, região de aterrissagem e categoria, permitindo analisar a frequência dos eventos ciclónicos no Canal de Moçambique e dos que aterrissaram na costa moçambicana ao longo da série temporal em estudo.

b. Temperatura da Superficie do Mar (TSM)

A TSM é um parâmetro importante para a formação e desenvolvimento de ciclone tropical, na pesquisa foram utilizados dados horários da TSM com uma resolução de espacial de 0.25º (~ 25 Km), disponibilizados na base de dados da European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), especificamente no produto European Reanalysis Atmosferic (ERA 5), disponível no seguinte site: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form. O ERA 5 combina dados de modelos com observações globais, os quais foram adquiridos no formato NetCDF e para todo o mês de março do ano 2019 e janeiro de 2021, sendo os períodos de ocorrências dos Ciclones Idai e Eloise, respectivamente. Os dados foram processados no programa MATLAB (versão R2013a).

c. Salinidade superficial do mar (SSM)

Os dados de SSM foram adquiridos no Global Ocean Reanalysis and Simulation (GLORYS) da base de dados de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), encontrados no site: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030, sendo dados de resolução espacial de 0.083º (~ 8 Km) e no formato NetCDF. O GLORYS combina dados de satélites e observados.

Foram obtidos dois conjuntos de dados com diferentes resoluções temporais, sendo um mensal e outro diário. O dado mensal abrangeu o período completo de estudo, de 2008 a 2023, e foi utilizado para determinar a extensão média da pluma do Rio Zambeze ao longo da série temporal em análise. A extensão média da pluma permitiu a definição de pontos de controle dentro e fora da pluma. O dado diário foi adquirido para os dias 14 de Março de 2019 e 23 de Janeiro de 2021, datas em que os ciclones tropicais Idai e Eloise interagiram com a pluma do Rio Zambeze, respectivamente. Os dados diários foram utilizados para determinar a extensão da pluma nos dias de interação com os ciclones tropicais, sendo os dados processados no programa MATLAB (versão R2013a).

Tabela 2: *Resumo da descrição dos dados usados.*

Parâmetros	**Fonte**	**Resolução**	
		Temporal	**Espacial**
Trajectória e velocidade de vento dos eventos ciclónicos	IBTrACS	Horária	0.1° x 0.1°
TSM	ERA 5	Horária	0.25º x 0.25º
SSM	GLORYS	Mensal e diária	0.083º x 0.083º

3.2.2. Métodos

No presente estudo, o termo "evento ciclónico" abrange tanto tempestades quanto ciclones tropicais. A "intensidade dos ciclones", por sua vez, refere-se à medida da força dos ciclones, expressa em termos de velocidade do vento ou categoria, que indica o potencial destrutivo da tempestade. A intensidade foi definida a partir da velocidade do vento, onde o aumento da velocidade de vento dos ciclones tropicais corresponde ao aumento de suas intensidades.

Definiu-se área do SWIO como de 0 - 40°S de latitude e 30 - 100°E de longitude. Considerou-se também ciclones tropicais intensos, os de alta velocidade de vento, a partir da categoria de 3, enquanto os de categoria 1 e 2 considerados como menos ou não intensos. O tópico compreende várias etapas, sendo:

i. Delimitação da extensão da pluma do Rio Zambeze

Para a delimitação da extensão da pluma foi utilizado a equação 1. A equação representa a anomalia de salinidade e foi adaptada da equação definida por Garvine (1999). Esta metodologia foi escolhida pela sua eficácia e facilidade em identificar a pluma a partir da variabilidade espacial da salinidade, comparando a salinidade da água fluvial com a água salgada circundante. Ao fornecer um índice de salinidade normalizado e um limiar para a extensão da pluma, a equação permite delimitar a área onde a

influência do Rio Zambeze é mais evidente, facilitando comparações e replicabilidade do estudo em outras regiões.

$$s = (S_a - S)/(S_a - S_m) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

s representa a anomalia de salinidade em *PSU*;

S a salinidade ao longo de todo Canal de Moçambique;

S_a o valor máximo e S_m o valor mínimo de salinidade no Canal de Moçambique.

O valor de anomalia de salinidade varia de 0 á 1, onde os valores próximos de 1 indicam regiões de menor salinidade enquanto os valores próximos de 0 indicam regiões de maior de salinidade e a isolinha de 0.1 representa o limite da pluma.

ii. Comparação das flutuações da TSM dentro e fora da pluma durante aterrissagem dos ciclones

Para cada ciclone selecionado (Idai e Eloise) foram escolhidos dois pontos de controle: um localizado fora e o outro dentro da pluma do Rio Zambeze, de seguida extraiu-se e analisou-se as flutuações da TSM em cada ponto ao longo do tempo, de modo a perceber a sua variação durante a aterrissagem dos ciclones. De seguida efetuou-se o cálculo da variação da TSM usando a equação 2, e para as abordagens de calor ou transferência de energia térmica, usou-se a equação 3.

$$\Delta TSM = \frac{TSM_f - TSM_i}{t_f - t_i} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ΔTSM representa a variação da TSM em graus celsius por dia (ºC/dia);

TSM_f representa a TSM final em ºC, enquanto TSM_i, a TSM inicial;

t_f representa o tempo final em dia enquanto t_i, o tempo inicial.

$$\Delta Q = C.\Delta TSM \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

ΔQ representa calor ou energia térmica transferido entre os sistemas oceano-atmosfera em joules (J);

C a capacidade calorifica do corpo, nesse estudo, da água do mar.

De acordo com Serway (1996), C da água do mar á 25º C de temperatura é igual 3.89 J/(g ºC). Valores positivos de ΔQ indicam ganho de energia enquanto negativo perda, para o oceano.

iii. Caracterização da variação da intensidade dos ciclones com e sem interacção com a pluma do Rio Zambeze

Para alcançar o objectivo, foram analisadas as trajetórias e intensidades dos ciclones tropicais, comparando aqueles que interagiram com a pluma do Rio Zambeze (Idai e Eloise) com os que não tiveram interação com a pluma, como Kenneth e Dineo, focando-se nas mudanças em suas intensidades ao aproximar-se da Costa de Moçambique. Para os ciclones com interacção com a pluma focou-se nas alterações das suas intensidades ao interagirem com pluma. O objectivo da análise é compreender de que forma a interação com a pluma influencia a intensidade dos ciclones, verificando se os ciclones tendem a aumentar ou diminuir de intensidade ao entrarem na área da pluma.

iv. Relação entre a intensidade dos ciclones tropicais e a anomalia de salinidade na região da pluma do Rio Zambeze

Para alcançar o objectivo, foram extraídos os valores de anomalia de salinidade e velocidade do vento dos ciclones nos pontos observados dentro da área da pluma do Rio Zambeze ao longo das trajectórias dos ciclones. Em seguida, a variação da velocidade do vento dos ciclones foi calculada por meio da adaptação da equação 2. Por fim, considerando 6 observações (N=6), correspondentes aos pontos localizados dentro da pluma ao longo das trajectórias dos ciclones na área, os valores de variação da velocidade do vento foram utilizados para o cálculo da correlação de Pearson, com o objectivo de quantificar a relação linear existente entre as duas variáveis. A correlação Pearson apresenta valores variando de -1 a 1, onde o valor -1 indica uma relação linear negativa perfeita, enquanto o valor 1 indica uma relação linear positiva perfeita. Por outro lado, o valor 0 indica ausência de relação linear entre as variáveis (Morettin e Bussab, 2015).

4. Resultados e discussão

4.1. Resultados

4.1.1. Identificação da região preferencial de aterrissagem dos ciclones tropicais na Costa de Moçambique

Todos os Eventos ciclónicos e suas respetivas trajectórias ao longo do SWIO na série temporal de 2008 a 2023 são ilustrados na Figura 7. No intervalo de 2008-2023, ocorreram cerca de 229 eventos ciclónicos ao longo do SWIO, dos quais 41 foram observados no Canal de Moçambique e 17 aterrissaram na costa moçambicana.

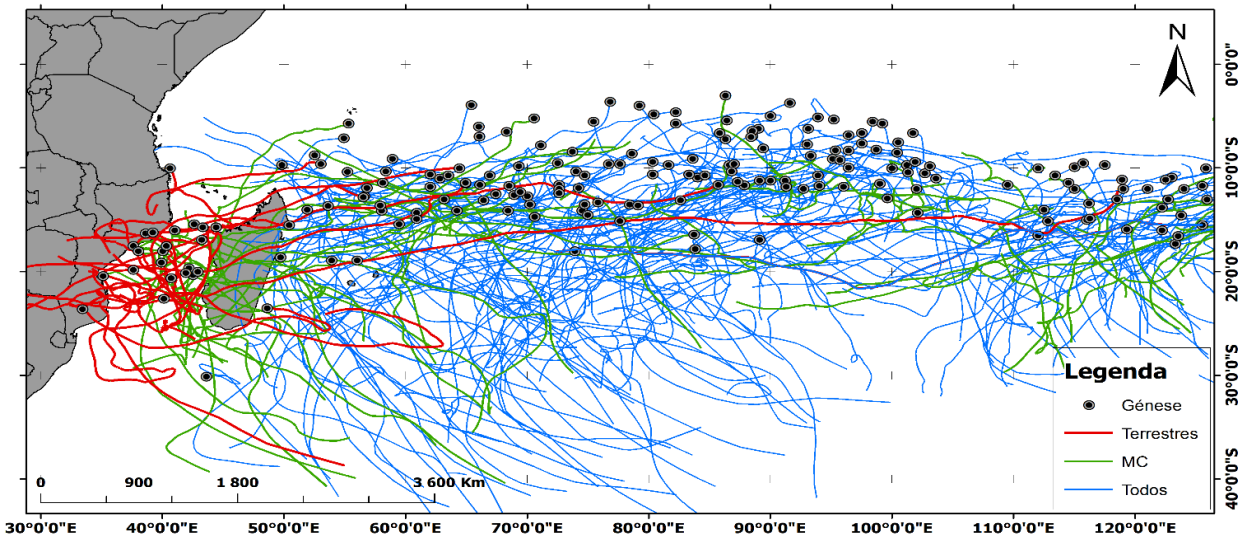

***Figura 7**: Trajectórias dos Eventos ciclónicos no SWIO ao longo da série temporal de 2008-2023. Linhas verdes representam eventos registados no Canal de Moçambique e vermelhas, os que aterrissaram na costa de Moçambique.*

A Figura 8 mostra que o Canal de Moçambique registrou uma predominância de ciclones tropicais em relação às tempestades tropicais, com 23 ciclones e apenas 8 tempestades entre os 41 eventos ciclónicos registrados. Em quase todos os anos houve a ocorrência de pelo menos um evento ciclónico, excepto em 2016 e 2018. Os anos de 2008, 2012, 2019 e 2022 destacaram-se com um total de cinco eventos, consistindo em três ciclones e duas tempestades. O ano de 2012 foi o único com uma distribuição inversa, constituído por dois ciclones e três tempestades.

Dividindo a série temporal em dois períodos, de 2008 a 2015 e de 2016 a 2023, observa-se uma redução no número de tempestades tropicais no canal, de 12 para 6 eventos, e um leve aumento no número de

ciclones tropicais, de 11 para 12 eventos. Vale destacar que, enquanto no período de 2008 a 2015 verificou-se eventos em todos os anos, no período entre 2016 e 2023 houve dois anos sem registro.

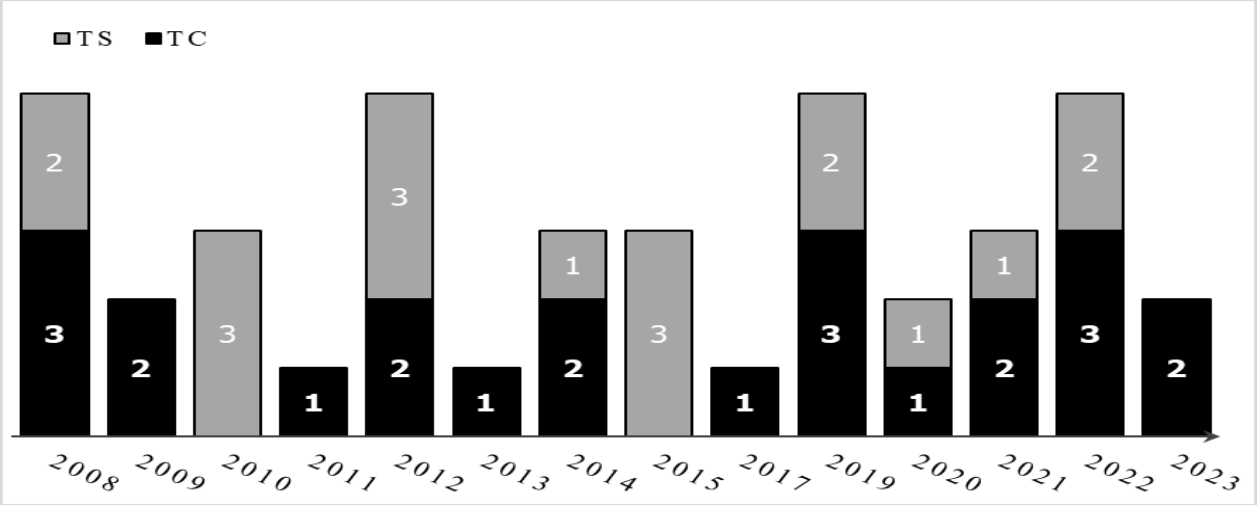

***Figura 8**: Número de Eventos ciclónicos registado no Canal de Moçambique ao longo da série temporal.*

Dos 17 eventos ciclónicos que aterrissaram na Costa de Moçambique, 12 foram registados como ciclones tropicais e 5 como tempestades tropicais, o que permite afirmar que ao longo da série temporal a costa moçambicana foi mais fustigada por ciclones tropicais que por tempestades, de salientar que em quase todos os anos de registo de eventos na costa, o ano de 2012 foi o único sem registo de ciclone (Figura 9).

A tabela 3 mostra menor parte dos eventos ciclónicos no Canal de Moçambique ocorreu no mês de Abril, com 2 registros, enquanto a maior parte concentrou-se nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, com 14, 11 e 9 eventos, respectivamente. As tempestades tropicais e os ciclones tropicais de categoria 4 foram os mais frequentes, com valores de 16 e 8 eventos, enquanto os ciclones de categoria 5 foram os mais raros no Canal de Moçambique.

Em relação aos dados dos eventos que atingiram a costa moçambicana, observa-se que a maioria ocorreu nos meses de Janeiro e Março, com 6 eventos em cada mês, seguidos de Fevereiro, com 3 eventos. Abril foi o mês com o menor número de eventos ciclónicos, registrando apenas 2 ocorrências. A costa moçambicana foi mais afectada por tempestades tropicais e ciclones tropicais de categorias 2, 3 e 4, com valor de 5 para as tempestades e 3 para os ciclones tropicais em cada categoria. Ciclones de categoria 5 foram raros, como resultado do baixo número de eventos de tal categoria no canal.

Conforme observado nos resultados anteriores, o número total de ciclones tropicais supera o de tempestades tropicais, tanto no canal quanto nos eventos que atingiram a costa. Um cenário similar é

observado entre ciclones tropicais intensos e menos intensos, com 15 intensos e 8 menos intensos no canal, e 7 intensos contra 5 menos intensos com aterrissagem na costa. Vale destacar que 4 dos ciclones intensos atingiram a costa em Março, enquanto em Janeiro observou-se apenas ciclones menos intensos.

A maioria dos eventos ciclónicos atingiu a região Centro do país, totalizando 8 ocorrências, das quais 6 foram ciclones tropicais e 2 tempestades tropicais. A região Sul apresentou um total de 5 eventos, enquanto a região Norte 4, com 3 ciclones tropicais em cada uma das duas regiões (Figura 10).

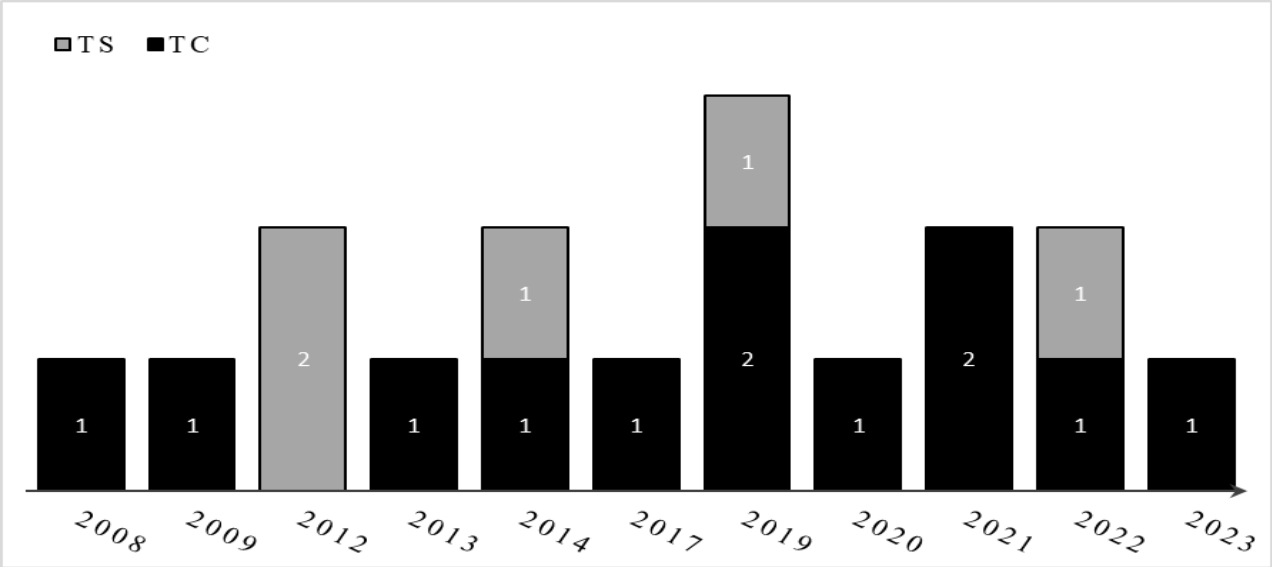

***Figura 9**: Número de Eventos ciclónicos com aterrissagem na costa de Moçambique.*

Tabela 3: *Distribuição dos Eventos ciclónicos em categoria e meses (Novembro – Abril) no Canal de Moçambique e os que aterrissaram na Costa de Moçambique ao longo da série temporal 2008-2023.*

Categorias	**Canal de Moçambique**						**Total**
	Meses						
	Nov	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	
TS	–	1	8	3	3	1	16
1	–	1	1	1	1	–	4
2	–	–	2	2	–	–	4
3	–	1	–	2	2	–	5
4	–	–	2	3	2	1	8
5	–	–	1	–	1	–	2
Total	0	3	14	11	9	2	39
Categorias	**Costa de Moçambique**						**Total**
	Nov	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	
TS	–	–	4	–	1	–	5
1	–	–	1	–	1	–	2
2	–	–	1	2	–	–	3
3	–	–	–	1	2	–	3
4	–	–	–	–	1	2	3
5	–	–	–	–	1	–	1
Total	0	0	6	3	6	2	17

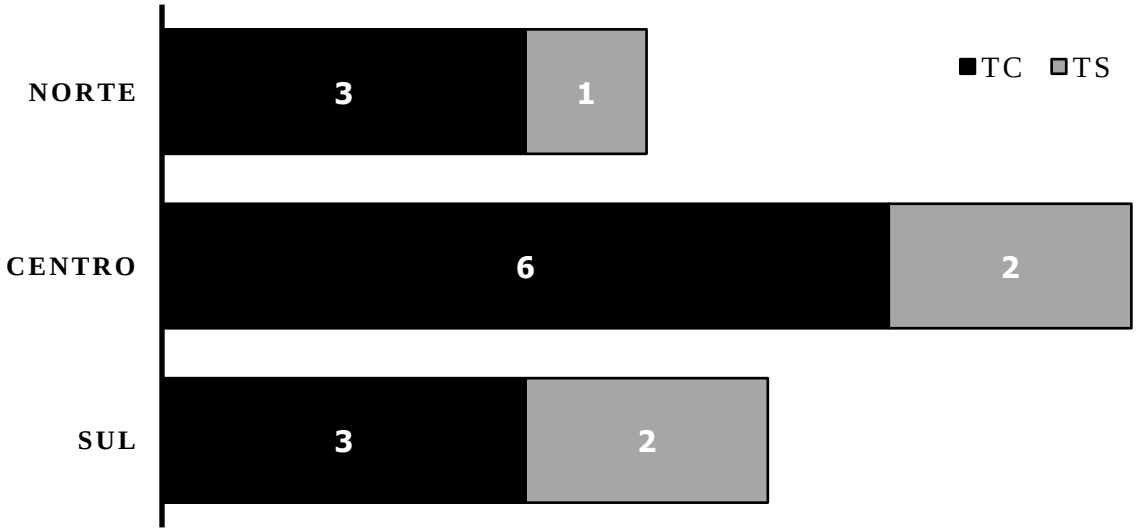

***Figura 10**: Região de aterrissagem dos eventos ciclónicos ao longo da costa moçambicana.*

4.1.2. Delimitação da extensão média da pluma do Rio Zambeze e comparação das flutuações da TSM dentro e fora da pluma durante a aterrissagem dos ciclones tropicais

A figura 11 ilustra a extensão média da pluma do Rio Zambeze para os períodos de 2008 a 2023, assim como as trajectórias dos ciclones tropicais Idai e Eloise, destacando os pontos de controle localizados dentro e fora da pluma. É possível observar que a pluma se estende da região norte até centro, sendo mais notável na região central a partir da sua ampla cobertura longitudinal.

É possível também observar que os dois ciclones interagiram com pluma do Rio Zambeze na região centro, a área de maior extensão da pluma. Os pontos de controle A e B localizados fora pluma e os pontos C e D dentro da pluma permitiram compreender o padrão de variação da TSM na área da pluma e na região do oceano aberto durante o processo de aterrissagem dos ciclones tropicais.

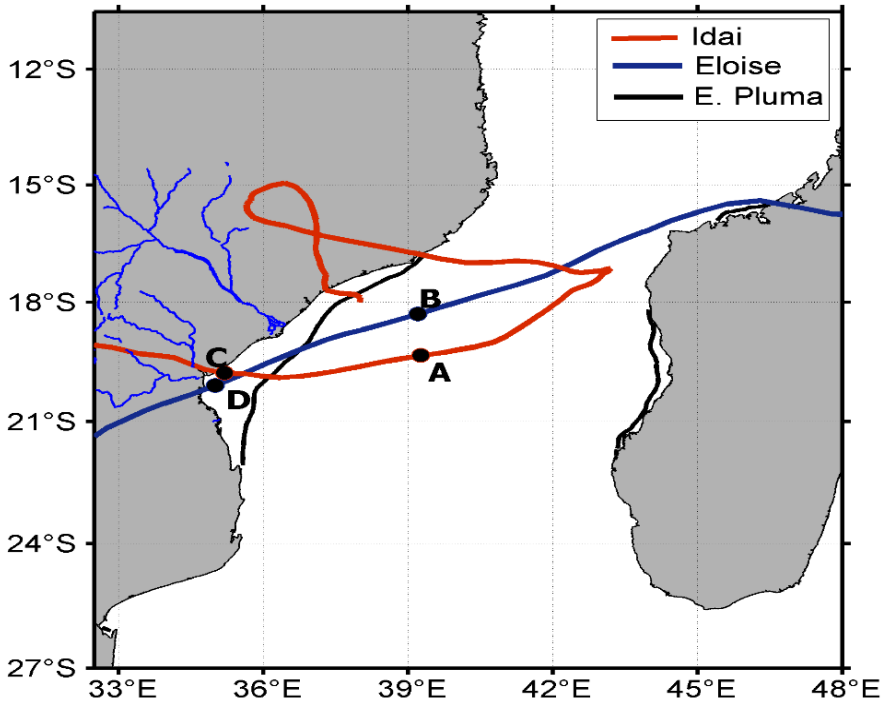

***Figura 11**: Extensão média da pluma do Rio Zambeze e trajectória dos Ciclones Idai e Eloise, com destaque dos pontos de controle A, B, C e D.*

Quanto as flutuações da TSM, figura 12 mostra uma rápida diminuição da TSM durante a aproximação dos ciclones tropicais nos pontos fora da pluma e uma resistência à redução da TSM nos pontos dentro da pluma. Verificou-se nos pontos A e B localizados fora da pluma uma diminuição contínua da TSM com a aproximação dos ciclones, e mesmo após suas passagens, a TSM permaneceu baixa.

No ponto A, um dia antes da chegada do Ciclone Idai (12 de março), a TSM era de aproximadamente 28.5ºC, reduzindo para 28,1ºC durante a passagem do ciclone e alcançando seu valor mais baixo de 27.3ºC em 14 de Março. A notável redução da TSM evidencia uma perda significativa de energia térmica na superfície do mar, com variações térmicas de aproximadamente -0.37 e -0.41 ºC/dia nos dias 13 e 14. No ponto B, o comportamento foi similar, com a TSM diminuindo continuamente de 29,9ºC para 29.3ºC e, posteriormente, para 28,5ºC, correspondendo, aos dias 21, 22 e 23 de Janeiro, respectivamente, que representam os períodos antes, durante e após a passagem do Ciclone Eloise. As variações de TSM no ponto B foram de cerca de -0,6 e -0,7 ºC/dia nos dias 22 e 23.

Nos pontos dentro da pluma do Rio Zambeze (C e D) observa-se alta resistência ao esfriamento da superfície oceânica durante todo processo de propagação (antes, durante e após a passagem) dos ciclones tropicais na região da pluma, apresentando apenas uma ligeira diminuição da TSM. A ligeira diminuição da TSM observada no ponto C foi na ordem de 0.04º C durante a passagem do Ciclone Idai, apresentando

maior perda de energia térmica uma semana depois da passagem do Idai, com a variação da TSM na ordem de -0.6 ºC/dia.

No ponto D, também foi observada uma resistência à redução da TSM. Durante a passagem do Ciclone Eloise, a TSM apresentou um ligeiro aumento, seguido por uma leve diminuição no dia seguinte. Os pontos C e D mostraram comportamentos diferenciados apenas no período em que resistiram à redução da TSM. Enquanto o ponto C apresentou uma perda considerável de energia térmica uma semana após a passagem do ciclone tropical Idai, o ponto D mostrou uma variação da TSM de -0.6 ºC/dia 48 horas após a passagem do Ciclone Eloise.

Embora a diminuição da TSM no ponto D tenha sido rápida em comparação com as flutuações observadas no ponto C, a temperatura manteve-se abaixo dos 30ºC por apenas dois dias. Isso indica que, apesar da resposta às condições do Ciclone Eloise no ponto D, a recuperação da TSM foi relativamente rápida em relação às flutuações observadas nos pontos fora da área da pluma.

Em suma, apesar de todos os pontos apresentarem uma diminuição da TSM com a aproximação de ciclone tropical, nos pontos dentro da pluma do Rio Zambeze verificou-se menor redução da TSM em comparação com os pontos fora da pluma, recordando que este parâmetro é um dos mais importantes no processo de manutenção dos ciclones tropicais, fornecendo energia térmica para o seu desenvolvimento.

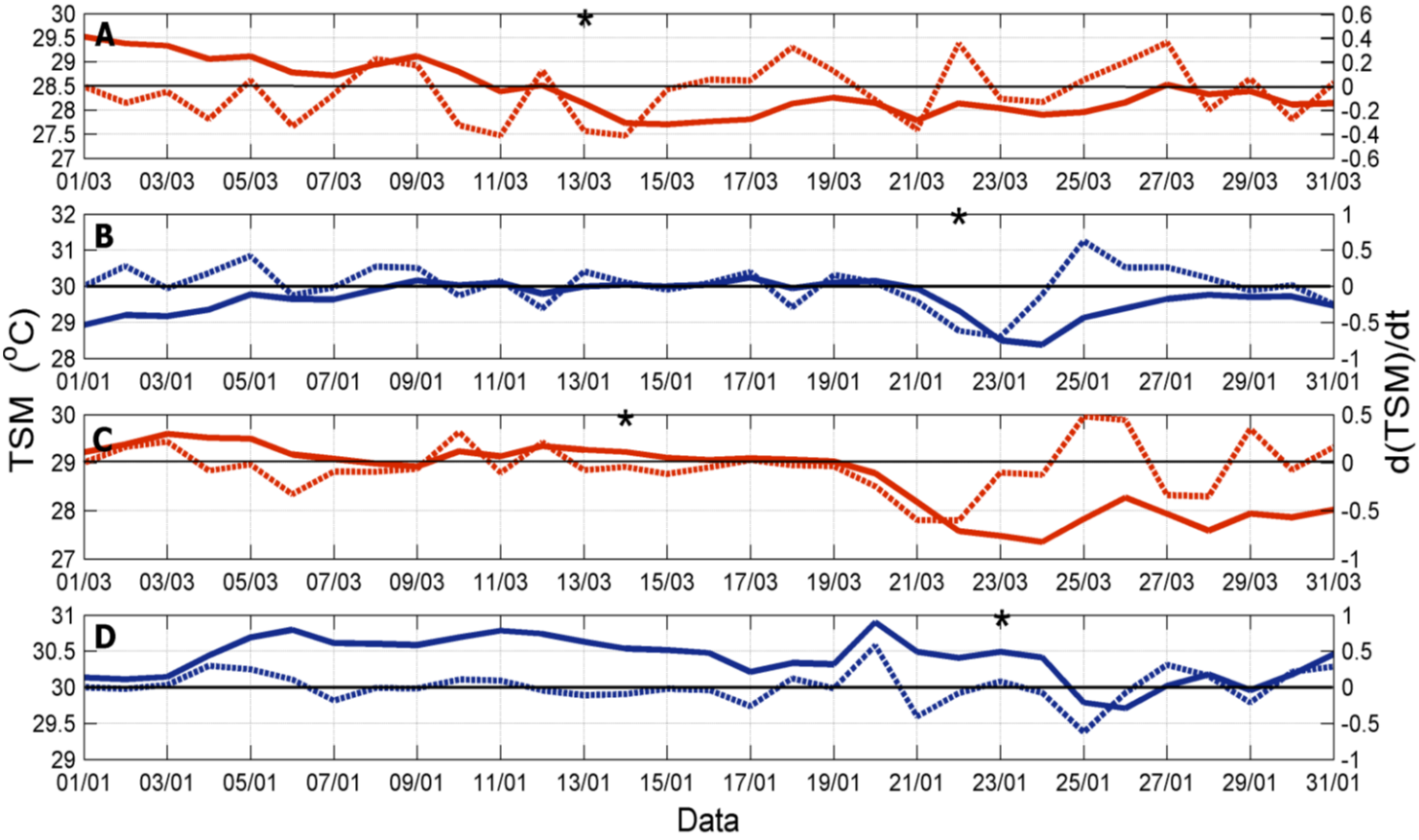

***Figura 12**: Flutuações da TSM durante a passagem dos ciclones tropicais nos pontos de controle A, B, C e D. O asterix indica o dia de passagem do ciclone tropical no ponto, linhas continuas indicam a TSM e as tracejadas a variação da TSM em função de tempo.*

4.1.3. Caracterização da variação da intensidade dos ciclones com e sem interacção com a pluma do Rio Zambeze

A Figura 13 ilustra a trajectória e intensidade dos ciclones sem interacção com pluma, evidenciando que, em seus estágios iniciais, apresentavam intensidades fracas, intensificando-se à medida que se aproximavam da costa. Após alcançarem a intensidade máxima próximo à costa, a intensidade decaiu gradualmente até a total dissipação. Esse padrão foi observado em ambos os ciclones, embora o Ciclone Kenneth tenha se formado fora do Canal de Moçambique, enquanto o Ciclone Dineo no canal. Durante a aterrissagem do Dineo, foi detectada a presença da pluma do Rio Zambeze na região sul, apresentando massa de água diluída e curta extensão longitudinal. O ciclone atravessou a pluma, mas não foi possível registrar dados diretamente dentro da pluma diluída, devido à coleta de dados em intervalos de três horas.

Contudo, ao analisar os pontos antes e depois da pluma, notou-se uma redução gradual da intensidade do ciclone após atingir o ápice.

A Figura 14, por sua vez, ilustra a trajectória e intensidade dos ciclones com interacção com a pluma do Rio Zambeze, mostrando que os ciclones tropicais tendem a aumentar suas intensidades ao interagirem com a pluma. No caso do Ciclone Idai, após alcançar a intensidade máxima, o Idai começou a decair, chegando à categoria 2 antes de interagir com a pluma. Durante a interacção com a pluma do Rio Zambeze, o ciclone tropical foi se intensificando novamente, havendo registo de dois pontos dentro da área da pluma. O primeiro com uma anomalia de salinidade de 0.13 e uma velocidade do vento de 167 km/h (categoria 2). À medida que o ciclone adentrou mais na pluma, a anomalia de salinidade aumentou para 0.79, resultando em uma intensificação do ciclone para 185 km/h (categoria 3).

O Ciclone Eloise apresentou um comportamento semelhante ao do Idai, permitindo uma melhor observação da influência da pluma na intensificação do ciclone tropical. A Figura 14 demonstra que, quanto mais o ciclone penetra na área da pluma, maior é a sua velocidade de vento. Quando o Ciclone Eloise entrou na zona da pluma, sua velocidade do vento era de aproximadamente 148 km/h, com uma anomalia de salinidade de cerca de 0.18. Ao avançar para o segundo ponto, o aumento da anomalia de salinidade resultou em um incremento na velocidade do vento, que passou de 148 para 157 km/h, enquanto a anomalia de salinidade alcançou o valor de 0.27. No último ponto registrado dentro da pluma, a velocidade do vento foi 166 km/h para a anomalia de salinidade de 0.696, mostrando a existência de uma forte relação entre os ciclones tropicais e a pluma do Rio Zambeze.

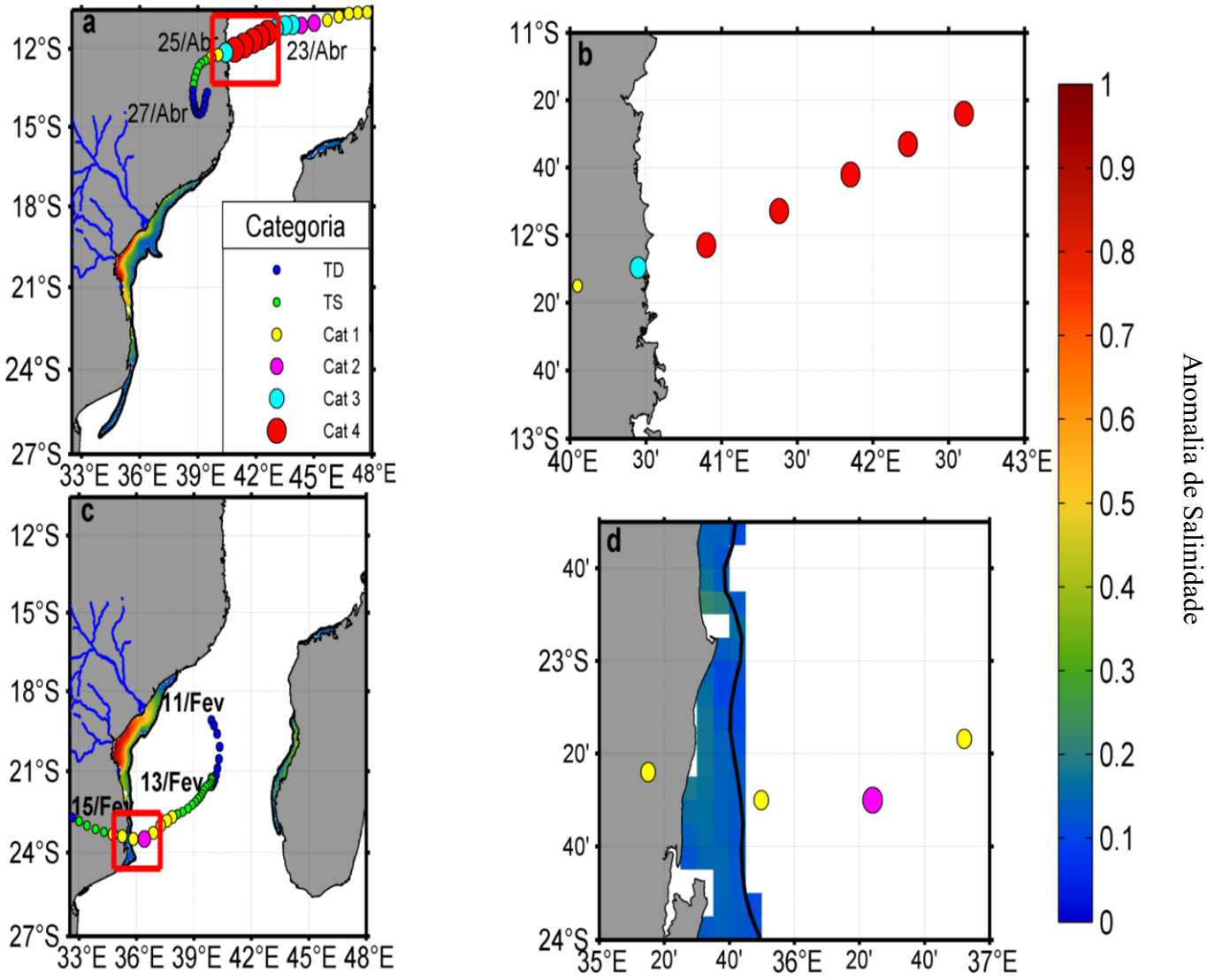

***Figura 13**: Trajectória e intensidade dos ciclones tropicais sem interação com pluma. Kenneth (figura a e b) e Dineo (c e d), destacando o limite da pluma do Rio Zambeze (linha preta). As figuras b e d são realce ou zoom das áreas sob retângulo vermelho nas figuras a e c, respectivamente.*

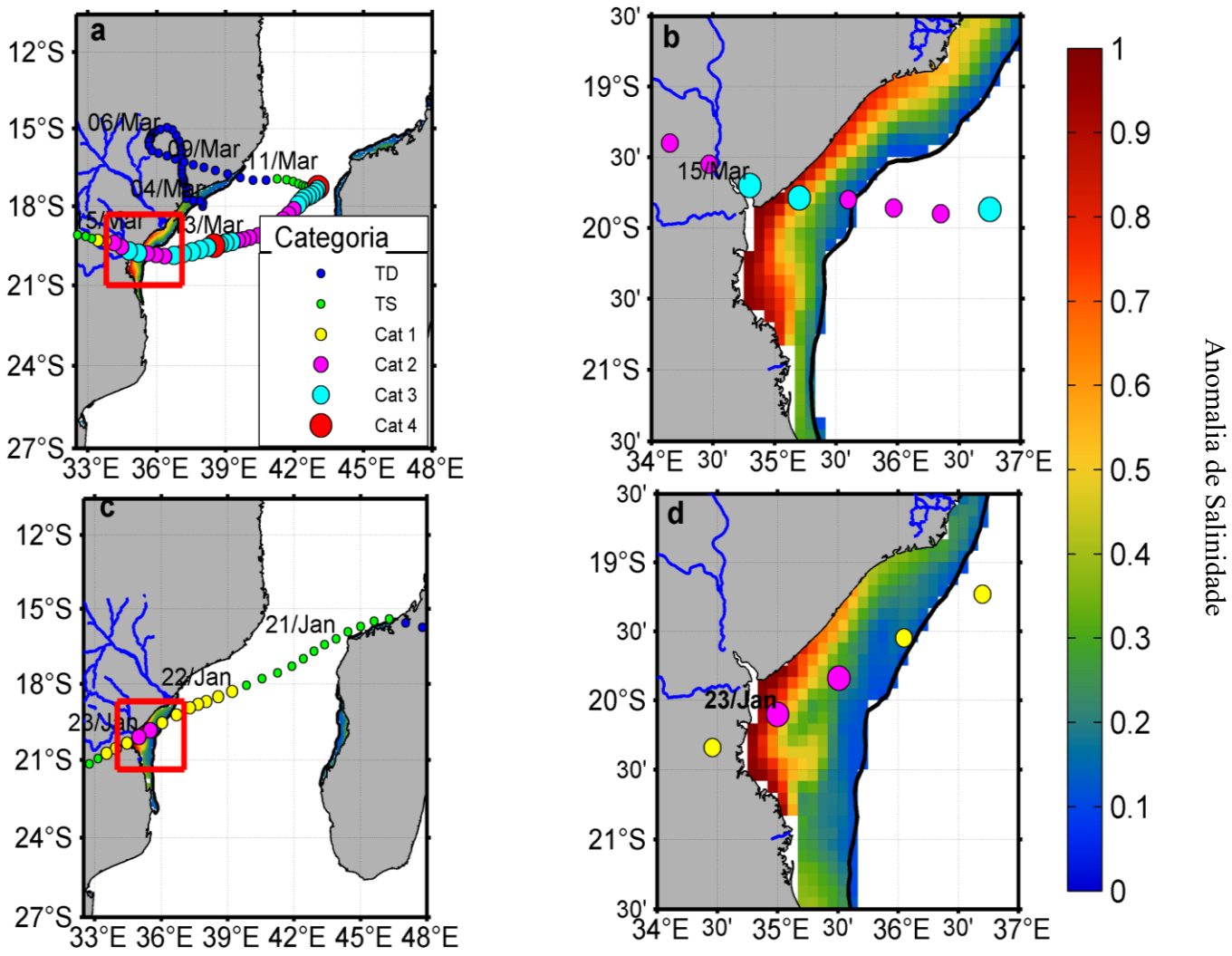

***Figura 14**: Trajectória e intensidade dos Ciclones Idai (a e b) e Eloise (c e d) durante a interacção com a pluma do Rio Zambeze, destacando o limite da pluma (linha preta). As figuras b e d são realce ou zoom das áreas sob retângulo vermelho nas figuras a e c, respectivamente.*

4.1.4. Relação da intensidade dos ciclones tropicais com a anomalia de salinidade

A figura 15 ilustra a relação existente entre a anomalia de salinidade e intensidade dos ciclones tropicais durante a interacção com a pluma do Rio Zambeze. O coeficiente de determinação (R^2) de 0.7179 apresentado na figura indica que aproximadamente 72% da variabilidade na intensidade de ciclones que passam da região pode ser explicada pela anomalia de salinidade, ou seja, pela existência da pluma do Rio Zambeze.

O coeficiente de correlação (R), que é a raiz quadrada de R^2, tem um valor aproximado de 0.85, apontando para uma correlação positiva e alta. Isso significa que a anomalia de salinidade exerce uma influência significativa na variação da intensidade dos ciclones, evidenciando uma relação diretamente proporcional entre as duas variáveis. Em termos práticos, cada aumento de 0.1 na anomalia de salinidade corresponde a um aumento de aproximadamente 2.1 km/h na velocidade do vento dos ciclones, conforme mostrado pela equação da linha de tendência. Apesar de ser uma correlação alta, ela não é forte, sugerindo que outros factores além da pluma podem estar contribuindo para a intensificação dos ciclones.

Esses resultados confirmam que a pluma do Rio Zambeze desempenha um papel importante na intensificação dos ciclones tropicais que passam sobre a região, ao elevar a TSM e, consequentemente, a disponibilidade de humidade na área, condições estas que favorecem o fortalecimento desses ciclones.

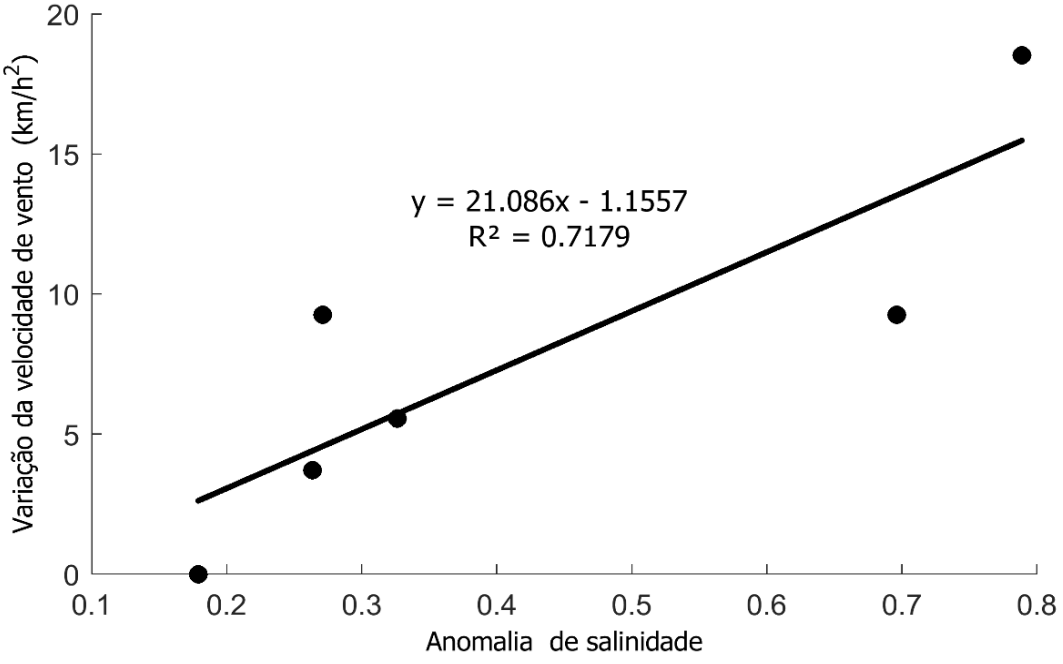

***Figura 15**: Relação entre a anomalia de salinidade e a intensidade dos ciclones tropicais durante a interação com a pluma do Rio Zambeze.*

4.2. Discussão

A análise da distribuição sazonal dos eventos ciclónicos na costa moçambicana, conforme apresentada na Tabela 3, destaca Janeiro como o mês de maior ocorrência, seguido de Fevereiro e Março. Os resultados indicam uma consistência temporal na frequência dos eventos, atendendo que os resultados semelhantes foram também observados por Matimbe (2004) e Mavume *et al*., (2009), sugerindo uma previsibilidade sazonal na região. A área central da costa moçambicana, identificada como a principal rota de aterrissagem dos ciclones, reflete um padrão estável que pode estar associado às condições atmosféricas e oceânicas específicas da área, favorecendo o direccionamento e a intensificação de ciclones durante os primeiros meses do ano.

O período de Janeiro a Março corresponde ao de maior extensão da pluma do Rio Zambeze, em função das intensas descargas fluviais observadas durante o período (Nehama, 2008). A coincidência entre o período de alta extensão da pluma e o de maior frequência de eventos ciclónicos sugere uma possível influência da pluma na atração e intensificação dos ciclones na região. O maior número de ciclones tropicais intensos, observados em Março, coincide com o pico da extensão da pluma do Rio Zambeze, reforçando a hipótese da influência da pluma no fortalecimento dos eventos ciclónicos.

Além da maior extensão da pluma observada na região centro, esta região do Canal de Moçambique é também caracterizada por apresentar vórtices oceânicos de grandes diâmetros e com alta energia cinética por consequência, que podem atrair e intensificar ciclones, direcionando-os para essa área. Provavelmente, a combinação de uma pluma extensa e quente e a dinâmica dos vórtices na região, faz com que a região centro seja uma rota preferencial para os ciclones.

As variações na TSM e nos padrões de circulação atmosférica durante a estação chuvosa contribuem para a formação e intensificação de ciclones (Nassor, 1994). A hipótese é reforçada pelo estudo de Tamele Júnior (2019), que destaca o período de Janeiro á Março como o mais chuvoso de Moçambique. Knutson & Tuleya (2004), propõem a existência de um processo de retroalimentação entre ciclones e a pluma fluvial, sugerindo que ciclones intensos causam chuvas fortes, aumentando o fluxo do rio e, consequentemente, a extensão da pluma. Isso pode criar um ciclo onde a pluma influencia os ciclones, e os ciclones, por sua vez, aumentam a extensão da pluma, criando assim um sistema de feedback positivo, onde os ciclones tornam-se mais intensos. Assim sendo, o sistema de feedback positivo pode explicar a coincidência entre os períodos de maior extensão da pluma e maior frequência de ciclones, particularmente entre Janeiro e Março.

A análise das flutuações da TSM dentro e fora da área da pluma do Rio Zambeze (Figura 12) revelou comportamentos distintos durante a passagem dos ciclones tropicais, evidenciando a complexidade da interacção entre os sistemas oceânicos e atmosféricos na região. Nos pontos fora da área da pluma, observou-se um rápido esfriamento da TSM, causado pelo afloramento de águas profundas induzido pelos intensos campos de vento associados aos ciclones tropicais.

A redução da TSM é diretamente influenciada pelo campo de vento, ou seja, pela intensidade de vento dos ciclones, que provoca uma mistura mais acentuada da coluna de água (Price *et al.*, 1994). O processo é especialmente relevante em ciclones de maior intensidade, onde a energia do vento é suficiente para penetrar profundamente na coluna de água, resultando em um resfriamento mais acentuado da superfície. Hlywiak e Nolan (2019) destacam que a capacidade dos ciclones tropicais de misturar a coluna de água é um dos principais factores que determinam a magnitude da redução da TSM, sendo mais pronunciada em eventos mais intensos. No entanto, o comportamento observado nos pontos fora da área da pluma do Rio Zambeze (A e B) foi inesperado. Apesar de o ponto A ter sido atingido pelo ciclone mais intenso (Idai), a energia térmica perdida foi baixa em comparação a perda observada no ponto B, onde perda de energia térmica foi mais significativa, apesar de ter sido atingido por um ciclone de menor intensidade (Eloise).

Em contraste, nos pontos dentro da área da pluma do Rio Zambeze, observou-se um comportamento diferenciado da TSM. A presença de uma camada de barreira, criada pela pluma, demonstrou uma significativa resistência ao esfriamento da superfície do mar. A pluma desempenha um papel significativo na modulação da resposta oceânica durante a passagem de ciclones tropicais, onde a camada de barreira, engrossada pela pluma, atua como um isolante, dificultando a difusão vertical do calor entre a superfície e as camadas mais profundas do oceano, mantendo a temperatura elevada na superfície (Hernandez *et al.,* 2016 e Hong *et al.,* 2022).

A cor escura do oceano na região da pluma, que resulta da alta concentração de sedimentos e matéria orgânica trazidos pelo rio, limita a penetração da luz solar nas camadas mais profundas, contribuindo para a retenção de calor na superfície (Newinger, 2015, Da & Foltz, 2022). A absorção de luz solar pela pluma pode até levar a um aumento localizado da TSM, processo observado durante a passagem dos Ciclones Idai e Eloise na área da pluma. A absorção selectiva da radiação solar impede que o calor seja redistribuído para camadas mais profundas, mantendo temperaturas mais elevadas na superfície mesmo sob condições de alta velocidade de vento dos ciclones.

A análise das Figuras 13 e 14 revela padrões distintos de comportamento entre os ciclones tropicais que interagiram e os que não interagiram com a pluma do Rio Zambeze. Nos pontos fora da área da pluma, os ciclones exibem um padrão tradicional de intensificação ao se aproximar da costa, atingindo o ápice e diminuindo gradualmente. Esse comportamento é justificado pela afloração das massas de água, onde massas de água mais frias são trazidas para a superfície do mar devido aos ventos intensos associados aos ciclones. Esse afloramento induz um sistema de feedback negativo, que resfria a superfície do mar e, consequentemente, diminui a energia disponível para alimentar o ciclone, resultando em uma redução de sua intensidade.

Comportamento semelhante foi observado por Androulidakis *et al.* (2016), que estudaram três ciclones tropicais com interacção com a plumas dos Rios Amazonas e Orinoco. Eles notaram que, embora o primeiro ciclone tenha mostrado intensificação ao interagir com a pluma, os dois ciclones subsequentes apresentaram uma diminuição gradual de intensidade. A diminuição foi atribuída ao aumento do resfriamento da superfície do mar, causado pela erosão da camada de barreira após a passagem do primeiro ciclone. A erosão da camada de barreira expôs a superfície do mar a águas mais frias das camadas inferiores, limitando a capacidade do oceano de manter as condições favoráveis para a intensificação dos ciclones.

Os ciclones que interagiram directamente com a pluma do Rio Zambeze apresentaram um comportamento diferente, com um aumento em suas intensidades conforme interagiam com a pluma, como evidenciado na Figura 14. O comportamento anômalo foi também observado em estudos anteriores (Androulidakis *et al*., 2016; Rudzin *et al*., 2020; Hong *et al*., 2022), que atribuem o aumento da intensidade dos ciclones à presença da camada de barreira induzida pela pluma dos rios.

A presença da camada de barreira não apenas bloqueia a afloração de massas de água, mas também mantém a energia térmica na superfície em níveis suficientes para alimentar os ciclones através da humidade adicional para a atmosfera, aumentando a disponibilidade de vapor de água que alimenta o ciclone. A combinação de alta TSM e alta humidade pode acelerar os processos convectivos dentro do ciclone, levando a uma intensificação rápida. Diz ainda os autores Aiyyer & Wade (2021), que a interacção entre a pluma e os ciclones pode ser vista como um mecanismo de intensificação, onde a pluma atua como um reservatório de calor essencial para a manutenção da força dos ciclones.

Além dos mecanismos já mencionados, é relevante considerar também a estabilidade da coluna de água, onde a presença da pluma aumenta tal estabilidade (Ffield, 2007; Hong *et al*., 2022), mostrando que a

pluma do Rio Zambeze pode estar não apenas protegendo a TSM de esfriamentos acentuados, mas também contribuindo para um ambiente termodinâmico mais estável durante a passagem dos ciclones.

A análise dos resultados apresentados na Figura 15 evidencia uma relação directamente proporcional entre a anomalia de salinidade e a intensidade dos ciclones tropicais ao interagirem com a pluma do Rio Zambeze. O coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 0.72 indica que cerca de 72% da variação na intensidade dos ciclones que passam pela região pode ser explicada pelas mudanças na salinidade e TSM na área da pluma do Rio Zambeze. Entretanto, o coeficiente de determinação também revela que 28% da variação observada é influenciada por outros factores, que podem incluir a temperatura atmosférica, a presença de vórtices oceânicos, padrões de vento em grandes altitudes e as correntes oceânicas.

O coeficiente de correlação (R) de 0.85 por outro lado, reflete uma alta relação entre essas variáveis, sugerindo que a pluma não apenas influencia, mas potencialmente amplifica a intensidade dos ciclones. Em termos práticos, o aumento de 2.1 km/h na velocidade do vento para cada aumento de 0.1 *PSU* na anomalia de salinidade é uma descoberta significativa, indicando que a pluma do Rio Zambeze fornece as condições ideais para a intensificação dos ciclones, como o aumento da humidade e o aquecimento da superfície do mar.

A humidade do ar é um fator determinante na intensificação dos ciclones tropicais. Wu (2007) destaca que, durante a passagem de ciclones, a humidade atmosférica fornecida pela evaporação da água aumenta a disponibilidade de calor latente, o que intensifica a convecção atmosférica e fortalece o sistema ciclónico. O processo contribui directamente para o aumento da energia disponível para o ciclone, resultando em uma maior intensidade do evento.

Apesar dos resultados significativos, é importante reconhecer as limitações do presente estudo. A análise mais detalhada da influência da pluma do Rio Zambeze na trajectória dos ciclones tropicais e na estratificação térmica e halina durante a aterrissagem dos eventos na Costa de Moçambique poderia ter revelado uma conexão mais clara entre a pluma e o padrão (trajectória e intensidade) dos ciclones, respondendo melhor às hipóteses levantadas e fortalecendo as conclusões do estudo presente. No entanto, optou-se por manter o foco nas variáveis principais para garantir uma análise mais clara e objectiva. Além disso, a falta de recursos, como o tempo e as habilidades técnicas, principalmente para aplicação de modelagem adequada limitou a possibilidade de realizar tais análises no presente estudo.

5. Conclusões e recomendações

5.1. Conclusões

Diante dos resultados apresentados ao longo do trabalho chegou-se as seguintes conclusões:

- A região central do País permanece como área preferencial para aterrissagem dos ciclones.
- Fora da área da pluma, a TSM diminui rapidamente devido à afloração de massas de água induzida pelos ciclones enquanto dentro da área da pluma, a camada de barreira criada pela pluma do rio Zambeze impede essa diminuição, mantendo a TSM estável e elevada, e fornecendo energia térmica adicional para os ciclones tropicais.
- Os ciclones tropicais ao interagirem com a pluma do Rio Zambeze tendem a aumentar as suas velocidades de vento em cerca de 2.1 km/h para cada aumento de 0.1 na anomalia de salinidade, tornando-se mais intensos à medida que se movem para dentro da área da pluma, ao contrário dos ciclones que não interagem com pluma, que seguem um padrão tradicional, em que os ciclones atingem o ápice e dissipam-se gradualmente.
- A anomalia de salinidade e a intensidade de ciclones tropicais são diretamente proporcionais, com um coeficiente de correlação (R) de aproximadamente 0.85 (N=6), indicando uma correlação alta.

5.2. Recomendações

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se para estudos futuros que se:

1. Estude a influência da pluma do Rio Zambeze na trajectória dos ciclones tropicais durante a aterrissagem na Costa de Moçambique;
2. Avalie a estratificação térmica e halina na zona da pluma do Rio Zambeze durante a aterrissagem de ciclones tropicais; e
3. Modele as flutuações da TSM na zona da pluma do Rio Zambeze em diferentes cenários de descargas e intensidade de ciclones tropicais.

6. Referências bibliográficas

Aiyyer, A. e Wade, P. (2021). Acceleration of Tropical Cyclones As a Proxy For Extratropical Interactions: Synoptic-Scale Patterns and Long-Term Trends.

Androulidakis, Y. Kourafalou, V. Halliwell, G. Le Hénaff, M. Kang, H. Mehari, M. Atlas R. (2016). Hurricane interaction with the upper ocean in the Amazon-Orinoco plume region. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences, University of Miami, Miami, FL, USA. Doi: 10.1007/s10236-016-0997-0.

Bié, A. J. (2017). Estudo numérico de Marés meteorológicas na Costa de Moçambique. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo.

Bié, A. J. (2022). Ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico: representação em reanálises atmosféricas e experimentos de sensibilidade com modelo regional acoplado. Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, Departamento de ciências Atmosférica, São Paulo.

Buci, D. N. (2018). Grau de estratificação na coluna de água da costa leste da Tanzânia. Universidade Eduardo Mondlane Escola, Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane.

Cardoso, H. C. (2003). Estudo do Ciclone tropical Eline de Fevereiro de 2000 Utilizando o Modelo Operacional de Investigação de MM5. Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Física, Maputo.

Chaúque, 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. Universidade Eduardo Mondlane Escola, Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane.

Chitseve, H. A. (2021). Análise da influência dos vórtices na variabilidade dos fluxos do sistema acoplado oceano-atmosfera ao longo do Canal de Moçambique. Universidade Eduardo Mondlane Escola, Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane.

Da, S. & Foltz, G. (2022). Interannual Variability and Multiyear Trends of Sea Surface Salinity in the Amazon-Orinoco Plume Region From Satellite Observations and an Ocean Reanalysis.

de Azevedo. J. L. L., e Mata, M. M. (2010). O mecanismo de autopropulsão de Vórtices oceânicos: Uma revisão. Revista Brasileira de Geofísica 28(3):331-347.

de Quadro, M. F. L. (2012). Estudo de Vórtices Ciclónicos de Mesoescala associados á Zona de Convergência do Atlântico Sul. Tese de Doutoramento. São Paulo, Brazil.

dos Santos, I. R., e Otoni, J. P. (2013). Impactos De Mudanças Climáticas Nos Recursos Hídricos. Revista Brasileira de Ciências da Amazônia, v2, n1 – 2013. ISSN: 2317-5729.

Emanuel, K. (1986). An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. J. Atmos. Sci., 43(6), 585–604.

Emanuel, Kerry. (2003). Tropical cyclones. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 31, 75–104. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141259.

Ffield, A. (2007), Amazon and Orinoco River plumes and NBC Rings: Bystanders or participants in hurricane events?, J. Clim., 20, 316–333.

Foltz, G. R., and McPhaden, M. J. (2009). Impact of barrier layer thickness on SST in the central tropical North Atlantic. J. Clim. 22, 285–299. doi: 10.1175/ 2008JCLI2308.1.

Frank, W. M. (1977). The structure and Energetics of the Tropical Cyclone I. Storm Structure. Monthly Weather Reviem, 105(9), 1119-1135. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<1119:tsaeot>2.0.co;2.

Garvine RW. 1999. Penetration of buoyant coastal discharge onto the continental shelf: a numerical model experiment. Journal of Physical Oceanography 29: 1892–1909.

Glitzenhirn, E. (2015). Relevância do acoplamento Oceano-Atmosfera na representação do Ciclone Catarina. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo.

Gray, W. M. (1968). Global View of the origino f Tropical Disturbances and Storms. Monthly Weather Reviem, 96(10), 669-700. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2.

Grodsky, S. A. *et al* (2012). Haline hurricane wake in the Amazon / Orinoco plume: AQUARIUS / SACD and SMOS observations. Geophysical Research Letters, v. 39, p. 4–11. CASTELÃO, G. P.; JOHNS, W. E. Sea surface structure of North Brazil Current rings derived from shipboard and moored acoustic Doppler current profiler observations. Journal of Geophysical Research, v. 116, p. 1–12, 2011.

Halo, I., Backeberg, B., Penven, P., Ansorge, I., Reason, C. e Ullgren, J.E., (2014). Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. Deep Sea Res., Part II 100, pp. 38–53. https://doi.org/ 10.1016/j.dsr2.2013.10.15.

Hernandez, O., J. Jouanno, and F. Durand (2016), Do the Amazon and Orinoco freshwater plumes really matter for hurricane-induced ocean surface cooling?, J. Geophys. Res. Oceans, 121, 2119–2141, doi:10.1002/ 2015JC011021.

Hlywiak, J. e Nolan, D. S. (2019). The Influence of Oceanic Barrier Layers on Tropical Cyclone Intensity as Determined through Idealized, Coupled Numerical Simulations. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences, University of Miami, Miami, Florida;

Hoguane, A. M. and Armando, E. V. (2015). The influence of the river runoff in the artisanal fisheries catches in tropical coastal waters – The case of the Zambezi River and the fisheries catches in the northern Sofala Bank, Mozambique. Journal of Integrated Coastal Zone Management, 15(4):443-451 (2015). DOI: 10.5894/rgci600.

Hong J-S, Moon J-H, Kim T, You SH, Byun K-Y and Eom H. (2022). Role of Salinity-Induced Barrier Layer in Air-Sea Interaction During the Intensification of a Typhoon. Front. Mar. Sci. 9:844003. doi: 10.3389/fmars.2022.844003.

IBTrACS, (2019). Technical Documentation.

IHO, (1953). Limits of the Oceans and Seas. Tech. rep., Internation Hydrographic Organization, Imp, Monte Carlo.

Instituto Nacional de Meteorologia (INAM), IP. (2022). Avaliação da época chuvosa 2021 – 2022. Departamento de Planificação e Pesquisa.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Jullien, S. (2013). Ocean response and feedback to Tropical Cyclones in the South Pacific: processes and climatology. Toulouse: HAL.

Knutson, T. R. & Tuleya, R. E. Impact of CO2-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. J. Clim. 17, 3477–-3495 (2004).

Langa, A. A. A. (2018). Efeito do Vento e do Fluxo de Calor no Ciclo Anual da Clorofila no Norte do Canal de Moçambique. Tese de Doutoramento, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.

Lin I-I, Liu WT, Wu C-C, Chiang JCH, Sui C-H (2003) Satellite observations of modulation of surface winds by Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes 275 typhoon-induced ocean cooling. Geophys Res Lett 30(3): 10.1029=2002GL015674.

Lutjeharms, JRE (2006). “O oceano costeiro do sudeste da África”, in The Sea, vol. 14B. Eds. AR Robinson e KH Brink (Cambridge: Harvard University Press), 783–834.

Machaieie, H. A., Nehama, F. P. J., Silva, C. G. e de Oliveira, E. N. (2022). Avaliação por satélite da variabilidade da pluma costeira e sua relação com variáveis ambientais no Banco de Sofala. Frente. Mar. Sci. 9:897429. doi: 10.3389/fmars.2022.897429.

Mathias, R. D. (2012). Análise e classificação de Ciclones utilizando Diagramas de fase: Conceitos e aplicação em previsão de Tempo operacional. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Rio de Janeiro.

Matimbe, L. A. (2004). Frequência de Ciclones Tropicais em Moçambique e a sua relação com a precipitação. Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de ciências, departamento de física, Maputo.

Mavume, A. F., Rydberg, L., Rouault, M., e Lutjeharms, J. R. (2009). Climatology and Landfall of Tropical Cyclones in the SouthWest Indian Ocean. ResearchGate, 8(1), 23.

Morettin, P. A., e Bussab, W. d. (2014). *Estatistica Basica.* Saraiva.

Nassor, A. (1994). Monsoon surges, tropical cyclones and extreme rainfall events in NW Madagascar. MSc thesis, University of Cape Town.

Nehama, F. P. J. (2008). Dynamics of the Zambezi River Plume. Master thesis, Bangor University, United Kingdom.

Newinger, C., (2015). The Barrier Layer and Ocean Colour in the Amazon and Orinoco Plume: Competing for the Oceanic Control on Tropical Cyclone Intensity. PhD Thesis, Imperial College London, Department of Physics.

Nhaca, A. R. A. (2015). Variabilidade temporal e espacial de concentração de clorofila-a no Banco de Sofala. Universidade Eduardo Mondlane Escola, Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane.

Ooyama, K. V. (1982). Conceptual Evolution of the Theory and Modeling of the Tropical Cyclone. Journal of the Meteorological Society of Japan, 60(1), 369–380. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.60.1_369;

Palmen, E. (1948). On the Formation and Structure of Tropical Hurricanes. Geophisica, 3, 26-38.

Piton, B., Pointeau, J. H., Ngoumbi, J. S., (1981). Atlas hydrologique du Canal de Mozambique (Ocean Indien). Trav. Doc. ORSTOM 132, 41pp.

Rudzin, J. E., Shay, L. K., e Jaimes de la Cruz, B. (2019). The impact of the Amazon–Orinoco River plume on enthalpy flux and air–sea interaction within Caribbean Sea tropical cyclones. Monthly Weather Review, 147(3), 931–950. https://doi.org/10.1175/MWR-D-18- 0295.1.

Rudzin, J. E., Chen, S., Sanabia, E. R., e Jayne, S. R. (2020). The air-sea response during Hurricane Irma's (2017) rapid intensification over the Amazon-Orinoco River plume as measured by atmospheric and oceanic observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2019JD032368. https://doi.org/ 10.1029/2019JD032368.

Sætre, R., da Silva, A. J. (1984). The circulation of the Mozambique Channel. Deep Sea Res. I 31, 485–508.

Serway, R. A. (1996). Física 2 para Cientistas e Engenheiros com Física Moderna. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A., Rio de Janeiro, Brasil.

Shay, L. K., Goni, G. J., e Black, P. G. (2000). Effects of a Warm Oceanic Feature on Hurricane Opal. Monthly Weather Review, 128, 1366–1383. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)1282.0.CO;2.

Siddorn, J. R., Bowers, D. G., e Hoguane, A. M. (2001). Detecting the Zambezi River Plume Using Observed Optical Properties. Marine pollution Buletin. 42, 942-950. doi: 10.1016/S0025-326X(01)00053-4.

Silva, T. C. e J. T. G. Tommaselli. (2007). Estimativa do Armazenamento de carbono dos Ipês do Parque do povo em Presidente Prudente-SP. XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. 356-369. NatalBrasil (9-13 de julho).

Tamele Júnior, H. I. (2019). Estudo da Variação Multi – Temporal da Temperatura, Precipitação e Humidade Relativa do Ar na cidade de Quelimane e sua relação com os índices oceânicos (1981 - 2016). Universidade Eduardo Mondlane Escola, Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane.

Yan, Y., L. Li, and C. Wang (2017), The effects of oceanic barrier layer on the upper ocean response to tropical cyclones, J. Geophys. Res. Oceans, 122, 4829–4844, doi:10.1002/ 2017JC01269.

Wang, Y., e Wu, C. C. (2004). Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes - A review. Meteorology and Atmospheric Physics, 87(4), 257–278. https://doi.org/10.1007/s00703-003-0055-6.

WMO. (2017). Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting.

Wu, L. (2007). Impact of Saharan air layer on hurricane peak intensity. Geophysical Research Letters 34(9). doi:10.1029/2007GL029564.

Anexo

Frequência dos eventos ciclónicos no SWIO

A análise revela uma tendência crescente nas actividades ciclónicas, tanto no SWIO quanto no Canal de Moçambique, assim como no número de ciclones que atingiram a costa, quando comparados aos resultados obtido por Mavume *et al*. (2009). De acordo com a presente pesquisa, no período de 16 anos (2008 á 2023), registrou-se um total de 229 eventos ciclónicos no SWIO, com 41 no canal e 17 atingindo a costa moçambicana. Esses números, embora inferiores aos registados por Mavume *et al.* (2009), com valores de 303 e 56 eventos no SWIO e Canal de Moçambique respectivamente, em um período de 28 anos (1980 á 2007), indicam uma crescente actividade ciclónica na região, até porque o número de eventos que atingiram a costa moçambicana nesses 16 anos é superior ao registado em 28 anos pelos mesmos autores. De acordo com os autores, esse aumento dos eventos ciclónicos pode justificado pelo aquecimento global que está criando condições propícias a formação desses sistemas.

Extensão da pluma do Rio Zambeze para os meses de janeiro a março

A figura 16 mostra a extensão média da pluma do Rio Zambeze nos meses de janeiro, fevereiro e março, evidenciando a variação espacial dessa região ao longo do tempo. É possivel observar ainda que a pluma se expande e se retrai conforme as condições hidrológicas e oceânicas variam durante o período das chuvas.

Em janeiro, a pluma apresenta uma extensão mais concentrada nas regiões próximas à foz do rio. À medida que o tempo avança, observa-se uma expansão gradual em fevereiro, com a pluma se estendendo ao longo da costa e espalhando-se mais para o norte. Em março, a pluma atinge sua maior extensão, abrangendo uma área mais ampla tanto ao longo da costa quanto no oceano, com uma dispersão mais uniforme, o que sugere um aumento na descarga fluvial e nas interações com as correntes oceânicas. Esses padrões de variação da pluma ao longo dos meses refletem as dinâmicas sazonais do Rio Zambeze e suas interações com o ambiente marinho circundante.

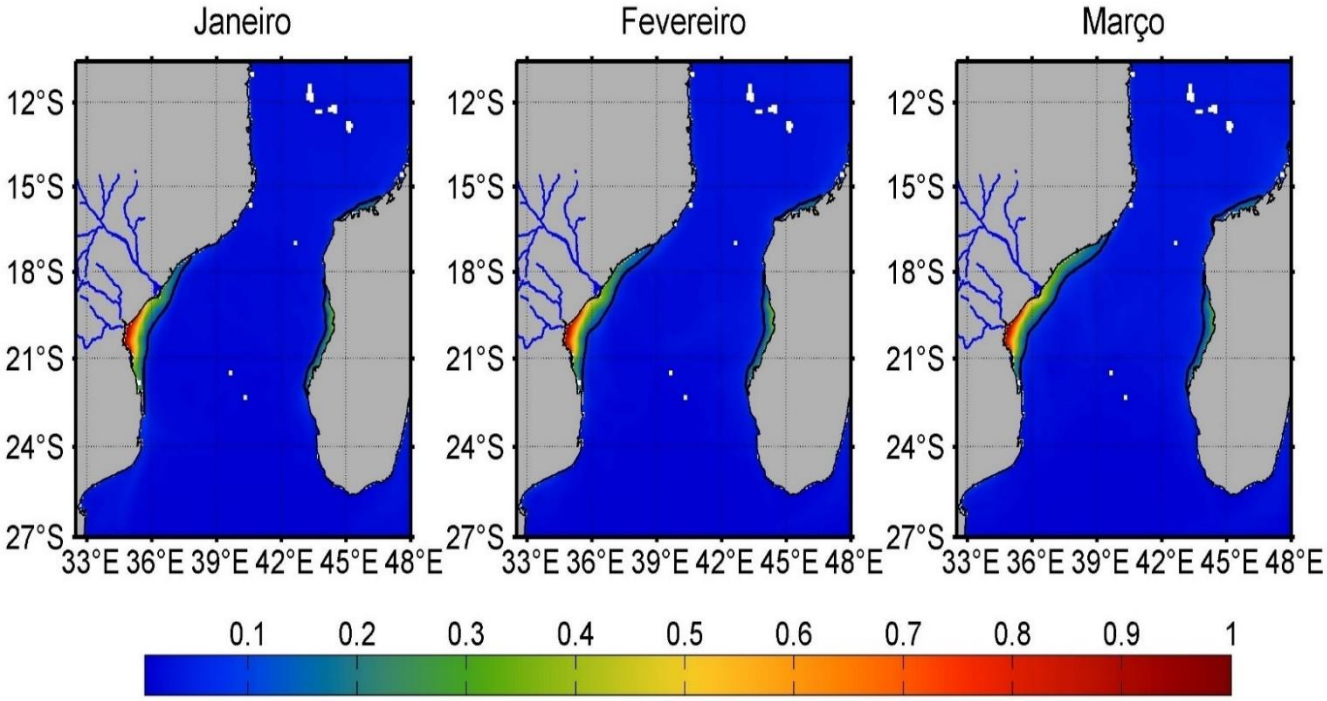

***Figura 16**: Extensão média da Pluma do Rio Zambeze nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março.*