



Escola Superior de Ciências Marinha e Costeiras

Monografia para Obtenção de Grau de Licenciatura em Química Marinha

Variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono em relação a Temperatura Superficial do Mar (de 1993 – 2022) no Canal de Moçambique

Autora:

Amina Ali Sufo

Quelimane, Agosto de 2025



Escola Superior de Ciências Marinha e Costeiras

Monografia para Obtenção de Grau de Licenciatura em Química Marinha

Varição temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono em relação a Temperatura Superficial do Mar (de 1993 – 2022) no Canal de Moçambique

Autora:

Amina Ali Sufo

(Amina Ali Sufo)

Supervisor:

B. Banito Magestade

(Mestre Banito Magestade)

Avaliadora:

Paula Milice

(Licenciada Paula Milice)

Presidente de Júri:

Stelio Mangue

(Licenciado Stelio Mangue)

Quelimane, Agosto de 2025

Dedicatória

Em primeiro lugar dedico este trabalho a Allah (Deus), por tornar possível a realização deste sonho. A minha mãe Fatima Sufo, meu tio Saide Sufo e a minha irmã Ana Jose Eduardo e minha família em geral por terem me apoiado incansavelmente para a concretização de mais um sonho dentro da minha vida.

" MEU MUITO OBRIGADO"



Agradecimentos

Alhamdulillah Rabi'Alamina, em primeiro lugar quero agradecer a Allah (SWT) pela vida e por tudo que tem me assegurado dia-a-dia durante o meu percurso.

Quero agradecer a minha mãe Fátima Sufo e ao meu tio Saide Sufo que foi como um pai pra mim, pelo amor, confiança que depositaram em mim, por sempre ter acreditado que era capaz e por tudo que fizeram por mim, meu muito obrigado vos amo.

Agradeço a toda minha família em especial minha avo Amina Insa, minha irmã Ana José Eduardo, minha tia Nina Sufo, Rabia Sufo, meu tio Ali Sufo, Ismael Sufo, aos meus primos Celso de Sousa, Saide Ide, Sufo Haider, Chude Issa, Latifo Issa, Abdala Omar, Adriano Ayuba e minhas primas Assina Bonga, Vânia Saide, Rufina Dade, Muanassa Salimo, Fátima Omar.

Agradeço ao meu supervisor MSc. Banito Magestade pelo apoio, compreensão, paciência e a disponibilidade na realização deste trabalho e todos os docentes e funcionários da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras. Agradeço aos meus professores e colegas da Madrassa Darul Hadice Isslamiyah, em especial ao professor Yahaya, professor Ibrahim, minhas colegas mana Nura, Amélia Branz, Elsa e Lisorita.

Agradeço a família Juma, em especial Zara Juma, Rafique Juma, pelo apoio, carinho, por me acolher e me considerar como da família meu muito obrigado. Ao meu irmão da faculdade Bento Arlindo Manuari, Luís Simbine, Wilder Muchanga pela ajuda, pelo apoio, motivação, não seria possível a realização de esse trabalho sem vos.

Aos meus amigos e colegas, em especial Valdimiro Chicova, Sualehe Andarusse, Daniel Sacur, José Molegueliua, Ludonia Leão, Gercia Direitinho, Gertrudes Alexandre, Nomssa, Amilton Roberto, Antônio Chale, Geltino Altino, Marisa Trindade, Ali Dauda, Brujane pela força, apoio, companheirismo. E a todos meus colegas da Escola Superior de Ciências Marinhas e costeira, em especial a turma dos químicos de 2020 e entre outros que directas ou indirectamente estiveram comigo durante a minha caminhada.

E por fim não menos importante agradeço ao meu companheiro de batalha, amigo, confidente, amor Hélio Pereira Magalua, pelo apoio, amor, paciência, dedicação, carinho, companheirismo, suporte, por sempre estar comigo nos bons e maus momentos, e por sempre ter acreditado em mim, meu muito obrigado amor.



Declaração de honra

Eu, **Amina Ali Sufo**, declaro por minha honra que esta monografia nunca foi apresentada em nenhuma instituição de ensino para a obtenção de nenhum grau académico e que ela resulta do meu esforço e dedicação. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de licenciatura em Química Marinha, na Universidade Eduardo Mondlane.

Quelimane, Agosto de 2025

A autora:

Amina Ali Sufo

(Amina Ali Sufo)



Resumo

O estudo do impacto das mudanças climáticas na variação da PP, NO_3^- , Si e CO_2 é fundamental para entender o funcionamento dos ecossistemas marinhos e a conservação da biodiversidade marinha. O presente estudo visa analisar a variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono em relação a Temperatura Superficial do Mar (de 1993 – 2022) no Canal de Moçambique, destacando a importância de entender essas dinâmicas para a conservação e gestão dos ecossistemas marinhos no Canal de Moçambique. Para a pesquisa foram analisados dados da PP, NO_3^- , Si, CO_2 e TSM, obtidos do Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) para o período de 1993 a 2022, totalizando 30 anos. A análise foi realizada por meio de simulações do modelo numérico BIORYS. Os resultados revelaram uma forte sazonalidade para todos os cinco parâmetros ao longo das três décadas analisadas. Em geral foram observadas maiores concentrações da PP, NO_3^- , Si, CO_2 e TSM no verão e menores no inverno, excepto para Si, que apresentou concentrações semelhantes na terceira década. A PP manteve-se constantes em todas as décadas. No verão, o NO_3^- variou, com maior concentração na segunda década em comparação com a primeira e terceira e no inverno as concentrações mantiveram-se constante ao longo das décadas. A Si no verão manteve-se constante e no inverno, houve variação, com maior concentração na terceira década em relação as duas primeiras. Houve variação do CO_2 ao longo das décadas, no verão, a maior concentração ocorreu na segunda e terceira década em relação a primeira década e no inverno, a maior concentração ocorreu terceira década em relação as duas primeiras décadas. Houve variação da TSM ao longo das décadas, no verão, a maior concentração ocorreu na segunda e terceira década em relação a primeira década e no inverno, a maior concentração ocorreu na terceira década em relação as duas primeiras décadas. A PP e NO_3^- apresentaram variações interanuais não uniformes com uma tendência decrescente, atingindo picos máximos em 1994 ($\sim 7 \text{ mg/m}^3/\text{dia}$) e 2002 ($0,2 \text{ mmol/m}^3$), respectivamente. A Si apresentou uma variação interanual uniforme com uma tendência decrescente, com o pico máximo no ano de 1993 ($3,5 \text{ mmol/m}^3$). O CO_2 apresentou uma variação uniforme com uma tendência crescente, com o pico máximo no ano de 2022 ($\sim 40 \text{ Pa}$). A TSM apresentou uma variação não uniforme com uma tendência crescente, com o pico máximo no ano de 2020 ($26,83^\circ\text{C}$). A relação entre TSM e PP representa uma correlação negativa forte ($r = -0,74$), a relação entre TSM e NO_3^- representa uma correlação negativa moderada ($r = -0,53$), a relação entre TSM e Si representa uma correlação negativa moderada ($r = -0,62$) a relação entre TSM e CO_2 representa uma correlação positiva moderada ($r = 0,63$). O estudo demonstrou que as mudanças climáticas têm influências na variação da PP, NO_3^- , Si e CO_2 no Canal de Moçambique.

Palavras-chave: Produtividade Primária, Mudanças Climáticas, Temperatura Superficial do Mar, Canal de Moçambique.

Abstract

The study of the impact of climate change on the variation of PP, NO_3^- , Si, and CO_2 is essential for understanding the functioning of marine ecosystems and the conservation of marine biodiversity. The present study aims to analyze the temporal variation of primary productivity, nitrate, silica and carbon dioxide in relation to Sea Surface Temperature (from 1993 – 2022) in the Mozambique Channel, highlighting the importance of understanding these dynamics for the conservation and management of marine ecosystems in the Mozambique Channel. Data on PP, NO_3^- , Si, CO_2 , and TSM were analyzed, obtained from the Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) for the period from 1993 to 2022, totaling 30 years. The analysis was conducted through simulations using the BIORYS numerical model. The results revealed strong seasonality for all five parameters over the three decades studied. Generally, higher concentrations of PP, NO_3^- , Si, CO_2 , and TSM were observed in summer, with lower concentrations in winter, except for Si, which showed similar concentrations in the third decade. PP remained constant across all decades. In summer, NO_3^- varied, with higher concentrations in the second decade compared to the first and third. In winter, concentrations remained stable over the decades. Si levels in summer remained constant, while in winter, there was variation, with higher concentrations in the third decade compared to the first two. CO_2 levels varied over the decades: in summer, the highest concentrations occurred in the second and third decades compared to the first, and in winter, the highest concentration was in the third decade relative to the first two. TSM also varied over the decades: in summer, the highest concentrations were in the second and third decades compared to the first, and in winter, the highest concentration was in the third decade relative to the first two. PP and NO_3^- showed non-uniform interannual variations with a decreasing trend, reaching maximum peaks in 1994 ($\sim 7 \text{ mg/m}^3/\text{day}$) and 2002 (0.2 mmol/m^3), respectively. Si exhibited a uniform interannual variation with a decreasing trend, peaking in 1993 (3.5 mmol/m^3). CO_2 showed a uniform increasing trend, reaching a maximum peak in 2022 ($\sim 40 \text{ Pa}$). TSM displayed a non-uniform increasing trend, with the highest peak in 2020 (26.83°C). The relationship between TSM and PP indicates a strong negative correlation ($r = -0.74$); between TSM and NO_3^- , a moderate negative correlation ($r = -0.53$); between TSM and Si, a moderate negative correlation ($r = -0.62$); and between TSM and CO_2 , a moderate positive correlation ($r = 0.63$). The study demonstrated that climate change influences the variation of PP, NO_3^- , Si, and CO_2 in the Mozambique Channel.

Keywords: Primary Productivity, Climate Change, Sea Surface Temperature, Mozambique Channel.



Lista de acrónimos, símbolos e siglas

H₂CO₃- Ácido carbônico

~ - Aproximadamente

° - Graus

°C - Graus Celsius

CH₄ - Metano

CMEMS - Copernicus Marine Environment Monitoring Service

CO₂ - Dióxido de carbono

ESCMC - Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

GLORYS - Global Ocean Reanalysis and Simulation

H₂O - Água

IPCC - International Panel on Climate Chang

Km - Quilómetro

m - Metro

MATLAB -Laboratório de Matrizes

mg/m³/dia - Miligrama por metros cúbicos por dia

mmol/m³ - Micros moles por metro cubico

NetCDF - Network Comand Data Form

NO₃⁻ - Nitrato

O₂ - Oxigênio

Pa - Pascal

pH - Potencial hidrogênio

PP - Produtividade Primaria

r – Coeficiente correlação

R² – Coeficiente de determinação

Si - Sílica

SiO₂ - Dióxido de silício

TAR - Terceiro Relatório de Avaliação

TSM - Temperatura Superficial da Mar

UEM - Universidade Eduardo Mondlane

Lista de figuras

Figura 1: Localização geográfica do Canal Moçambique. Fonte: ArcGIS.....	14
Figura 2: Variação sazonal da PP em cada década no Canal de Moçambique, nas três décadas, no verão a PP varia entre 0 e 200 mg/m ⁻³ /dia e no inverno varia entre 0 e ~50 mg/m ⁻³ /dia	17
Figura 3: Variação sazonal de NO ₃ ⁻ em cada década no Canal de Moçambique. No verão, a primeira década varia entre 0 e ~18 mmol/m ⁻³ , a segunda entre 0 e ~20 mmol/m ⁻³ e terceira entre 0 e 15 mmol/m ⁻³ . No inverno, nas três décadas varia entre 0 e 14 mmol/m ⁻³	18
Figura 4: Variação sazonal da Si em cada década no Canal de Moçambique, em todas as décadas no verão varia entre 0 e 20 mmol/m ⁻³ . No inverno, a primeira década varia entre 0 e ~18 mmol/m ⁻³ , a segunda entre 0 e ~20 mmol/m ⁻³ e a terceira entre 0 e 20 mmol/m ⁻³	19
Figura 5: Variação sazonal de CO ₂ em cada década no Canal de Moçambique. No verão, a primeira década varia entre 32 e 60 Pa; a segunda e terceira entre 32 e ~65 Pa. No inverno, a primeira década varia ente 28 e ~38 Pa, a segunda entre 30 e ~40 Pa, e a terceira entre 32 e 42 Pa.....	20
Figura 6: Variação sazonal de TSM em cada década no Canal de Moçambique. No verão, a primeira década varia entre 22 e 30°C, a segunda e terceira década varia entre 22 e 32°C. No inverno, a primeira e segunda década varia entre 22 e ~28°C e a terceira entre 22 e ~30°C	21
Figura 7: Variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar. A produtividade primária varia de 4,3 mg/m ⁻³ /dia a ~7 mg/m ⁻³ /dia (7.A). O nitrato varia de 0,13 mmol/m ⁻³ a 0,2 mmol/m ⁻³ (7.B). A sílica varia de 2,21 mmol/m ⁻³ a 3,5 mmol/m ⁻³ (7.C). O dióxido de carbono varia de 34 Pa a ~40 Pa (7.D). A Temperatura Superficial do Mar varia de 25,9°C a 26,8°C (7.E).....	22
Figura 8: Relação entre concentração: TSM com PP (8.A), TSM com NO ₃ ⁻ (8.B), TSM com Si (8.C) e TSM com CO ₂ (8.D).	24

Índice

Dedicatória.....	I
Agradecimentos	II
Declaração de honra	III
Resumo	IV
Abstract.....	V
Lista de acrónimos, símbolos e siglas	VI
Lista de figuras	VIII
CAPÍTULO I: Introdução e objectivos.....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Problema	2
1.2. Justificativa	2
1.3. Objectivos da pesquisa	3
1.3.1. Objectivo Geral	3
1.3.2. Objectivos Específicos	3
CAPITULO II: Revisão de literatura.....	4
2. Revisão de literatura.....	4
2.1. Nutrientes.....	4
2.1.1. Nitrato (NO_3^-).....	4
2.1.2. Sílica (Si).....	4
2.1.3. Factores que influenciam a distribuição de nutrientes.....	5
2.2. Produtividade Primária (PP)	6
2.2.1. Factores que influenciam na produtividade primária	7
2.3. Dióxido de carbono (CO_2)	8
2.3.1. Factores que influenciam na concentração de dióxido de carbono	8
2.4. Mudanças climáticas globais	9
2.4.1. Principais impactos das mudanças climáticas no meio aquático.....	10
2.4.2. Relação de Temperatura Superficial do Mar com produtividade primária, nitrato e sílica	11
2.5. O Sensoriamento Remoto	12
2.5.1. Formato NetCDF-4.....	12
2.5.2. Satélites.....	12
2.5.3. Resolução Espacial	12
2.5.4. Resolução Temporal	12
2.6. Métricas estatísticas	13

2.6.1. O coeficiente de correlação de Pearson.....	13
CAPITULO III: Material e Métodos	14
3. Metodologia	14
3.1. Descrição da Área de estudo.....	14
3.2. Descrição de dados	15
3.3. Processamento dos dados	16
CAPITULO IV: Resultados e Discussão.....	17
4. Resultados e Discussão	17
4.1. Resultados.....	17
4.1.1. Variação sazonal na concentração da produtividade primária, nitrato, sílica dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar em cada década (1993 - 2002; 2003 –2012; 2013 – 2022)	17
4.1.2. Variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica, dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar.....	21
4.1.3. Relação entre concentrações da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono com Temperatura Superficial do Mar.....	23
4.2. Discussão	25
CAPITULO V: Conclusões e Recomendações	29
5. Conclusões e Recomendações.....	29
5.1. Conclusão.....	29
5.2. Recomendação	29
6. Referências bibliográficas	30

CAPÍTULO I: Introdução e objectivos

1. Introdução

De acordo com o último relatório do IPCC, o aumento na temperatura global entre 1850-1899 e 2001-2005 foi de $0,76^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007) e desde as primeiras décadas do século XX, registrou-se um aumento de $0,6^{\circ}\text{C}$ nos oceanos (Beaugrand, 2009). Os modelos globais do IPCC têm mostrado que entre 1900 e 2100 a temperatura global pode aumentar entre 1.4 e 5.8°C , o que representa um aquecimento mais rápido do que aquele detectado no século XX e que, aparentemente, não possui precedentes durante, pelo menos, os últimos 10.000 anos (Marengo, 2006). As alterações climáticas que tem-se verificado nas últimas décadas, afectam directamente a taxa de produtividade primária (Behrenfeld *et al.*, 2006).

A produtividade primária, realizada pelo fitoplâncton, depende directamente da disponibilidade de nutrientes essenciais, como fosfato, nitrato, amônio e silicato e luz. Esses nutrientes são fundamentais para o crescimento de organismos aquáticos e o funcionamento dos ecossistemas, sendo estudados em diferentes ambientes, desde estuários até mares profundos, devido à sua relevância ecológica (Gomes *et al.*, 2018; Armengol *et al.*, 2019). A produção primária do fitoplâncton forma a base das cadeias tróficas marinhas, desempenhando um papel crucial na transferência de energia nos ecossistemas aquáticos (ODUM, 2004; Manzolli *et al.*, 2011; Esteves, 2011). O CO_2 é um componente essencial para a fotossíntese, mas o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera, causado pelas actividades humanas, está sendo absorvido pelos oceanos. Isso leva à acidificação oceânica, que pode prejudicar os organismos marinhos que constroem conchas e esqueletos de calcário (Orr *et al.*, 2005).

O Canal de Moçambique, situado entre a costa oriental da África e a ilha de Madagascar, é uma região oceânica de grande relevância para a circulação oceânica e a biogeoquímica do sudoeste do Oceano Índico. A dinâmica oceanográfica dessa região é complexa e influenciada por diversos factores, como correntes oceânicas, variações sazonais e, mais recentemente, os impactos das mudanças climáticas (Barbat *et al.*, 2015).

Estudos passados no canal de Moçambique sobre a produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono, se basearam apenas na distribuição espaço-temporal numa área específica e em períodos limitados, não fornecendo informações sobre a distribuição num período longo de anos e o impacto das mudanças climáticas na distribuição desses parâmetros. Portanto, o presente estudo visa analisar a variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono em relação Temperatura Superficial do Mar destacando a importância de entender essas dinâmicas para a conservação e gestão dos ecossistemas marinhos no Canal de Moçambique.

1.1. Problema

Nos últimos trinta anos, cientistas têm observado alterações significativas no sistema climático da Terra, atribuídas ao aumento médio da temperatura global desde 1950 (Silva e Colombo, 2019). As mudanças climáticas têm gerado um aumento na temperatura oceânica e atmosférica, interferindo assim nos padrões de precipitação, ventos e até mesmo nas estações do ano, o que vai trazer impactos na dinâmica oceânica afectando directamente o fluxo de nutrientes (Júlio, 2023; Antônio, 2023). O aquecimento global pode modificar os padrões de circulação oceânica e a ressurgência de águas ricas em nutrientes, que é vital para a produtividade fitoplanctônica (Henson *et al.*, 2017). A diminuição da ressurgência pode resultar em escassez de nutrientes em algumas áreas, enquanto que em certas áreas pode resultar em padrões de produtividade não uniformes e potencialmente em eventos de eutrofização em outras áreas (Antônio, 2023). As mudanças climáticas influenciam na troca gasosa entre atmosfera e oceano. O aumento do CO₂ atmosférico resulta na maior absorção de CO₂ pelos oceanos, levando à acidificação oceânica, que afecta processos biogeoquímicos e a saúde dos organismos que dependem de cálcio, como os corais e alguns fitoplâncton (Doney *et al.*, 2009).

Diante desse pressuposto surge a seguinte pergunta de pesquisa:

Qual é a influência da Temperatura Superficial do Mar na variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono no Canal de Moçambique?

1.2. Justificativa

Os nutrientes são importantes elementos químicos utilizados pelos organismos em suas actividades metabólicas (Niencheski, 2015), os nutrientes são primordiais para produção primária realizada pelo fitoplâncton, representando a base das cadeias tróficas responsáveis pelas transferências de energia alimentar aos níveis superiores (Odum, 2004; Manzolli, 2011). A falta desses nutrientes, limita o crescimento e a reprodução dos organismos afectando toda a cadeia alimentar e o excesso do mesmo, pode levar a efeitos deletérios como a produção de algas tóxicas (eutrofização) e a falta de oxigênio na água (Castello e Krug, 2015; Cutrim *et al.*, 2019).

Moçambique é um país altamente vulnerável às mudanças climáticas, com uma dependência significativa dos recursos marinhos (Conjo *et al.*, 2021). Compreender a variação da produtividade primária, dióxido de carbono e dos nutrientes no Canal de Moçambique é essencial para desenvolver estratégias de gestão sustentável e adaptação, garantindo a resiliência das comunidades que dependem desses recursos. Por outro lado, existe uma escassez de estudos sobre a variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono em relação a Temperatura Superficial do Mar no Canal de Moçambique. A falta de estudo limita a compreensão do impacto das mudanças

climáticas na distribuição desses parâmetros, sendo necessária uma maior pesquisa para preencher essa lacuna. A falta de estudos constitui a razão que levou a realização do presente estudo.

Portanto, o presente estudo fornecerá informações cruciais para o progresso científico na compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na variação da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono, essas informações permitirão identificar áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade marinha e a implementação de medidas de mitigação e adaptação à nova realidade ecológica e climáticas no Canal de Moçambique.

1.3. Objectivos da pesquisa

1.3.1. Objectivo Geral

- Analisar a variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono em relação a Temperatura Superficial do Mar (de 1993 – 2022) no Canal de Moçambique

1.3.2. Objectivos Específicos

- Caracterizar a variação sazonal na concentração da produtividade primária, nitrato, sílica dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar em cada década (1993 - 2002; 2003 – 2012; 2013 – 2022).
- Caracterizar a variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar;
- Relacionar as concentrações da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono com a Temperatura Superficial do Mar

CAPITULO II: Revisão de literatura

2. Revisão de literatura

2.1. Nutrientes

Os nutrientes são elementos químicos essenciais para o crescimento e reprodução dos organismos nos ecossistemas marinhos. Sua disponibilidade influencia profundamente a estrutura e a função desses ecossistemas, especialmente a produtividade primária, que forma a base da teia alimentar (Field *et al.*, 1998; Falkowski e Raven, 2007). Os nutrientes mais importantes nos ecossistemas aquáticos incluem o nitrogênio, fosfato, silício, ferro e outros micronutrientes como zinco, manganês, cobalto, molibdênio e cobre, também são importantes para o crescimento e metabolismo dos organismos marinhos (Filho, 2009).

2.1.1. Nitrato (NO_3^-)

O nitrato é uma forma oxidada de nitrogênio, representada quimicamente como NO_3^- . É um composto essencial que fornece nitrogênio para as plantas e fitoplâncton, necessário para a síntese de aminoácidos e proteínas. O nitrato é um nutriente fundamental para o crescimento das plantas e microrganismos aquáticos. Em ambientes marinhos, é um dos principais nutrientes limitantes para a produtividade primária, especialmente em regiões onde a luz e outros nutrientes estão presentes em abundância, mas o nitrogênio é escasso. Altas concentrações de nitrato podem levar à eutrofização, resultando no crescimento excessivo de algas e, potencialmente, à degradação da qualidade de água (Howarth, 2008).

2.1.2. Sílica (Si)

Sílica (Si) ou dióxido de silício (SiO_2) é um mineral encontrado abundantemente na natureza, principalmente na forma de areia e em diversas rochas. Nos ecossistemas aquáticos, a sílica é frequentemente encontrada dissolvida na água como silicato. A sílica é um nutriente essencial para algumas espécies de fitoplâncton, especialmente as diatomáceas, que precisam de sílica para formar suas paredes celulares (Tréguer *et al.*, 1995). Essas paredes são compostas por uma estrutura de sílica, conhecida como frustule. A disponibilidade de sílica pode influenciar a comunidade fitoplanctônica e a dinâmica dos ecossistemas marinhos (Nelson *et al.*, 1995).

2.1.3. Factores que influenciam a distribuição de nutrientes

A distribuição de nutrientes é influenciada por vários factores físicos, químicos e biológicos. Esses factores interagem de maneiras complexas, resultando em variações na disponibilidade e na distribuição de nutrientes nos ecossistemas aquáticos.

2.1.3.1. Factores Físicos

➤ Maré

As marés são um factor importante que influenciam na distribuição de nutrientes nas zonas costeiras. As marés agitam os sedimentos do fundo, libertam nutrientes para a coluna de água. Os padrões das marés também afectam o fluxo dos rios e estuários, que fornecem nutrientes às águas costeiras (Smith, 1995; Correll, 1985).

Quando as marés estão altas, a água dos rios e estuários é empurrada para o oceano. Quando as marés estão baixas, a água do oceano é empurrada para os rios e estuários. Esse fluxo de água doce pode transportar nutrientes para as águas costeiras. Os nutrientes transportados pela água doce podem ser usados por organismos bentônicos e planctônicos (Gerrison, 2019).

➤ Temperatura

As temperaturas mais quentes geralmente aumentam as taxas metabólicas e a absorção de nutrientes pelos organismos. Isso pode levar a um aumento na demanda por nutrientes, o que pode resultar em uma depleção de nutrientes nas águas costeiras. Além disso, as temperaturas mais altas podem levar à estratificação da água, o que pode dificultar a mistura de nutrientes (Smayda, 1990; Brown *et al.*, 2004).

➤ Salinidade

A salinidade é um factor importante que influencia na distribuição de nutrientes nas zonas costeiras. A composição das espécies influencia nos tipos de organismos que podem prosperar nas águas costeiras, afectando a ciclagem de nutrientes (Telesh e Khlebovich, 2010).

➤ Correntes e Mistura da Água

A movimentação da água, causada por correntes ou agitação do vento, pode redistribuir nutrientes. Ambientes com alta circulação geralmente têm uma distribuição mais uniforme de nutrientes. As correntes transportam nutrientes de uma área para outra, afectando a distribuição espacial de nutrientes nas zonas costeiras, as correntes mais rápidas transportam nutrientes mais longe, o que

pode levar a uma maior disponibilidade de nutrientes em áreas distantes das fontes de nutrientes (Huthnance, 1995).

➤ **Estratificação Térmica**

A estratificação térmica também é um factor importante que influencia na distribuição dos nutrientes nas zonas costeiras. A diferença de temperatura entre camadas de água pode limitar a mistura vertical e a disponibilidade de nutrientes em diferentes profundidades (Simpson e Sharples, 2012).

2.1.3.2. Factores Químicos

➤ **Oxigénio dissolvido**

O oxigénio é crucial para a dinâmica e caracterização de ecossistemas aquáticos, desempenhando um papel vital em processos como a fotossíntese, a respiração e depuração da matéria orgânica detritica, a atmosfera e a fotossíntese são as principais fontes de oxigénio para esses ecossistemas. Sua solubilidade na água é influenciada pela temperatura e pressão, com o aumento da temperatura e a diminuição da pressão ocorre diminuição da solubilidade do oxigénio na água (Canfield *et al.*, 2010). Níveis baixos de oxigénio dissolvido podem inibir a respiração e a decomposição, levando a depleção de nutrientes e a hipóxia (falta de oxigénio). A hipóxia impacta as quantidades dos ecossistemas costeiros (Diaz e Rosenberg, 2008).

2.1.3.3. Factores Biológicos

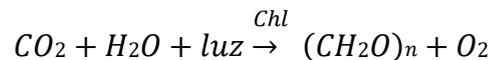
➤ **Ciclo de Nutrientes e herbívoros**

A actividade de microrganismos, fitoplâncton e zooplâncton afecta a transformação e a reciclagem de nutrientes. A decomposição da matéria orgânica libera nutrientes de volta ao ambiente. A presença de herbívoros pode influenciar a biomassa de fitoplâncton e, conseqüentemente, a quantidade de nutrientes disponíveis (Cole e Caraco, 2001; Berman-Frank *et al.*, 2007).

2.2. Produtividade Primária (PP)

A Produtividade Primária (PP) representa a taxa de produção de matéria orgânica por organismos autotróficos, principalmente através da fotossíntese. Esta designação deve-se ao facto de incidir no primeiro nível da cadeia alimentar (Field *et al.*, 1998). Nos ecossistemas aquáticos, o fitoplâncton desempenha o papel principal nesse processo, convertendo energia luminosa em energia química na forma de carboidratos, lípidos e proteínas (Falkowski e Raven, 2007). A Produtividade Primária é um processo importante que sustenta toda teia alimentar aquática, fornecendo base energética para níveis tróficos superiores., e é expressa em unidades de massa de carbono por unidade de volume/área por unidade de tempo (hora/dia/mês/ano) (Millero, 1996).

O processo fotossintético utiliza o dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O), luz e nutrientes na síntese de moléculas orgânicas de alta energia, liberando oxigênio (O₂) como produto final da reação (Falkowski; Raven, 2007; Sigman e Hain, 2012).



2.2.1. Factores que influenciam na produtividade primária

A produtividade primária em ambientes aquáticos é influenciada por diversos factores, físicos, químicos e biológicos, que incluem:

2.2.1.1. Factores físicos

➤ Luz Solar

A quantidade de luz que atinge a superfície dos sistemas aquáticos varia com a intensidade dos raios solares, dependendo da época do ano, sujeitos às condições atmosféricas (Franco, 2007). A quantidade e a qualidade da luz disponível afectam directamente a taxa de fotossíntese. Em ambientes aquáticos, a penetração da luz diminui com a profundidade, limitando a produtividade em águas mais profundas (McGowan e Walker, 1993).

➤ Temperatura

A temperatura da água influencia a taxa de metabolismo dos organismos fotossintetizantes. Temperaturas ótimas (15 a 25°C), favorecem a produtividade primária, enquanto temperaturas extremas podem ser prejudiciais (McMurtry *et al.*, 1989).

2.2.1.2. Factores Químicos

➤ Nutrientes

A disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio (nitrato) e fósforo, é crucial para o crescimento das plantas aquáticas e fitoplâncton. (Smith, 2003), principalmente na zona eufótica (100 – 200 m nos oceanos e 1 – 50 m para zonas costeiras) (Kaiser *et al.*, 2005). Abaixo da zona eufótica, as limitações de luz dificultam o desenvolvimento do fitoplâncton, apesar da alta concentração de nutrientes (Franco, 2007).

➤ CO₂

A concentração de dióxido de carbono disponível é fundamental para a fotossíntese. A acidificação dos oceanos, por exemplo, pode afetar a disponibilidade de CO₂ para organismos aquáticos (Raven e Beardall, 2003).

2.2.1.3. Factores Biológicos

➤ Clorofila-a

A clorofila-a é o pigmento clorofilino maioritário e universal em todos os grupos taxonómicos de algas, sendo o seu teor utilizado como índice de biomassa de fitoplâncton nas águas (Kaiser *et al.*, 2005). Assim sendo, quanto maior a concentração de clorofila-a no meio aquático maior a taxa de fotossíntese, o que implica maior produtividade primária (Franco, 2007).

2.3. Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) no oceano refere-se ao gás carbônico presente na água do mar, que desempenha um papel fundamental no ciclo global do carbono (IPCC, 2019). Quando o CO₂ atmosférico entra na superfície oceânica, ele se dissolve na água, formando ácido carbônico (H₂CO₃), que pode se dissociar em iões bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻) (Doney *et al.*, 2009). Essa interação influencia o pH do oceano, contribuindo para sua acidez. Além disso, o dióxido de carbono dissolvido no oceano é uma das principais formas de armazenamento de carbono na biosfera oceânica, ajudando a mitigar o impacto do aumento de gases de efeito estufa na atmosfera, embora também possa levar à acidificação dos oceanos, afetando os ecossistemas marinhos (Sabine *et al.*, 2004).

2.3.1. Factores que influenciam na concentração de dióxido de carbono

O dióxido de carbono (CO₂) no oceano é influenciada por diversos factores que afetam sua concentração e circulação, os principais factores são:

➤ Actividade Biológica

A actividade da biosfera marinha, especialmente a fotossíntese de fitoplâncton, reduz a concentração de CO₂ na superfície oceânica ao absorvê-lo da atmosfera. Quando o fitoplâncton realiza a fotossíntese, ele converte CO₂ em matéria orgânica, influenciando a quantidade de CO₂ dissolvido na água (Falkowski *et al.*, 1998).

➤ Temperatura da Água

Temperaturas mais baixas aumentam a solubilidade do CO₂ na água, facilitando sua dissolução. Assim, regiões de águas frias tendem a ter maior disponibilidade de CO₂ dissolvido em comparação às áreas mais quentes (Takahashi *et al.*, 2002).

➤ Circulação Oceânica

Os movimentos das correntes, como correntes superficiais e profundas, redistribuem o CO₂ ao longo do oceano, influenciando sua disponibilidade em diferentes regiões. Águas de origem polar, por exemplo, tendem a absorver mais CO₂ devido às temperaturas mais baixas (Sabine *et al.*, 2004).

➤ **Trocas Atmosfera-Oceano**

A troca de CO₂ entre a atmosfera e o oceano é governada pelo gradiente de concentração e por factores como vento, turbilhonamento e a área de contacto superficial. Ventos fortes aumentam a troca de gases, modificando a quantidade de CO₂ dissolvido (Wanninkhof, 1992).

➤ **pH e Composição Química da Água**

O pH do oceano influencia a forma química do carbono (dissolvido ou em formas bicarbonato e carbonato) e, sua disponibilidade. Sistemas de tamponamento químico podem limitar a quantidade de CO₂ que a água pode absorver (Feely *et al.*, 2004).

➤ **Actividades Humanas e Mudanças Climáticas**

A emissão de CO₂ na atmosfera devido às actividades humanas aumenta a quantidade de gás disponível para absorção pelos oceanos, levando ao fenómeno conhecido como acidificação oceânica (Doney *et al.*, 2009).

2.4. Mudanças climáticas globais

Define-se como Mudança Climática qualquer alteração no clima num período longo de tempo, que sejam mudanças de ordem natural ou resultado da actividade humana, ou da acção combinada desses dois vectores (Stocker *et al.*, 2010). O início da Revolução Industrial, no século XVIII, transformou a urbanização e o desenvolvimento, resultando em um desmatamento acelerado e na exploração de recursos naturais. A busca por espaço para indústrias e agropecuária levou à degradação ambiental, incluindo a destruição de matas ciliares e a queima de combustíveis fósseis, aumentando significativamente as emissões de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Esse processo contribuiu para o aquecimento global, elevando a temperatura média da Terra e intensificando eventos climáticos extremos, como os furacões (Hughes *et al.*, 2003; Hoegh-Guldberg, 2011).

O aumento das emissões dos gases do efeito estufa, principalmente do CO₂, eleva a temperatura média da terra. Tal efeito reflete sobre o ambiente marinho com o aumento da temperatura média dos oceanos, no qual, observações feitas desde 1961, demonstram que este aquecimento já alcançou até as regiões mais profundas dos oceanos, além dos 1000 m (Solomon *et al.*, 2007).

2.4.1. Principais impactos das mudanças climáticas no meio aquático

➤ Elevação da Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

O aumento da temperatura da água do mar é um dos principais impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas, influenciando directamente o crescimento celular e a composição química dos organismos. A temperatura actua como um factor limitante (Epley 1981); enquanto temperaturas próximas ao ideal aceleram a taxa de crescimento das microalgas, temperaturas excessivamente altas podem desnaturar proteínas, levando a um crescimento inverso (Ratkowsky *et al.*, 1983).

A distribuição do aumento de temperatura tem variações regionais, sendo mais acentuada no Hemisfério Norte, especialmente nas zonas subtropicais e temperadas do Oceano Atlântico, além das partes leste do Oceano Pacífico e do Oceano Índico. Esse aquecimento da camada superficial dos oceanos resulta em maior estratificação da coluna de água, o que impede a mistura com as camadas mais profundas e a disponibilização de nutrientes essenciais para o crescimento do fitoplâncton (Beaugrand, 2009). Essa limitação na oferta de nutrientes devido à estratificação prejudica a produtividade primária dos ecossistemas marinhos, uma vez que o fitoplâncton é a base da cadeia alimentar. A diminuição do fitoplâncton pode ter efeitos cascata sobre toda a biota marinha, afetando a saúde dos oceanos e a biodiversidade (Tremblay *et al.*, 2012).

➤ Aumento na concentração de CO₂ na água do mar: acidificação

Segundo ORR *et al.* (2009), os oceanos são responsáveis pela absorção anual de cerca de 25% do CO₂ liberado para a atmosfera. Se por um lado essa absorção alivia os impactos do aquecimento na atmosfera, por outro, faz com que os oceanos se tornem cada vez mais ácidos devido à reacção química que ocorre entre o CO₂ e a água do mar formando o ácido carbónico (H₂CO₃). Essa acidificação faz com que haja uma diminuição na disponibilidade de iões carbonato na água, elemento fundamental para a síntese das carapaças de algumas microalgas, além dos recifes de corais (Kleypas *et al.*, 1999; Feely *et al.*, 2004; Kleypas e Yates, 2009).

Outros impactos menos conhecidos da acidificação dos oceanos estão relacionados à propagação da luz e do som debaixo da água. De acordo com Brewer e Hester (2009), a ausência de partículas carbonáceas, como os cocolitoforídeos, facilita a passagem da luz ao longo da coluna de água fazendo com que a zona eufótica seja mais profunda. A zona eufótica é a camada onde há penetração da luz, tornando possível a realização da fotossíntese (Nybakken, 2001). Caso essa camada se torne mais profunda, pode ocorrer o aumento da produtividade primária. Já a redução de pelo menos 0,3 no pH poderia causar uma diminuição de 40% no coeficiente intrínseco de absorção do som, levando a

consequências ainda desconhecidas para animais que se utilizam do som para suas atividades diárias, como baleias e golfinhos.

2.4.2. Relação de Temperatura Superficial do Mar com produtividade primária, nitrato e sílica

A Temperatura Superficial do Mar (TSM) desempenha um papel crucial na regulação da produtividade primária, influenciando indirectamente os níveis de nitrato e sílica nos ecossistemas aquáticos. A relação, no entanto, é complexa e não linear, variando dependendo de outros factores ambientais e das características específicas do ecossistema.

➤ Temperatura Superficial do Mar (TSM) e Produtividade Primária (PP)

A TSM afecta a PP principalmente através de seu impacto na taxa de fotossíntese. Temperaturas ótimas para a fotossíntese variam entre as espécies de fitoplâncton (Behrenfeld *et al.*, 2006). Em geral, um aumento na TSM dentro de uma faixa ótima pode aumentar a taxa de fotossíntese e, conseqüentemente, a produtividade primária. No entanto, temperaturas muito altas podem inibir a fotossíntese, levando à redução da produtividade primária devido à desnaturação de enzimas e outros processos fisiológicos (Huete *et al.*, 1985). Além disso, a TSM afeta a estratificação da coluna de água, influenciando a disponibilidade de nutrientes para o fitoplâncton.

➤ Temperatura Superficial do Mar (TSM) e Nitrato (NO₃⁻)

A TSM afecta indirectamente os níveis de NO₃⁻ através de seu impacto na produtividade primária e na estratificação da coluna de água (Le Quéré *et al.*, 2005). Um aumento na produtividade primária, dentro da faixa ótima de temperatura, pode levar a uma diminuição nos níveis de nitrato devido ao consumo pelos organismos fotossintéticos. Por outro lado, a estratificação induzida por altas temperaturas pode reduzir a ressurgência de águas ricas em nitrato das camadas mais profundas, resultando em menores concentrações de nitrato na superfície (Moore *et al.*, 2008).

➤ Temperatura Superficial do Mar (TSM) e Sílica (Si)

Similarmente ao nitrato, a TSM afecta os níveis de Si indirectamente. Altas temperaturas podem aumentar a estratificação, reduzindo a ressurgência de águas ricas em sílica e limitando sua disponibilidade para o fitoplâncton (Tréguer *et al.*, 1995). Um aumento na produtividade primária de diatomáceas (que requerem sílica para suas frústulas) em temperaturas ótimas pode levar a uma diminuição nos níveis de sílica dissolvida na água (Nelson *et al.*, 1995).

2.5. O Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto é um conjunto de técnicas que permitem obter informação sobre um objecto ou fenómeno através da análise de dados recolhidos por um dispositivo que não está em contacto com o mesmo objecto ou fenómeno (Lillesand *et al.*, 2015).

2.5.1. Formato NetCDF-4

NetCDF-4 (Network Common Data Form versão 4) é um padrão de arquivo amplamente utilizado na comunidade científica para armazenamento e compartilhamento de dados científicos multidimensionais, especialmente em áreas como oceanografia, meteorologia, climatologia e geociências. Ele combina a simplicidade de acesso a dados com recursos avançados de armazenamento, incluindo compressão, hierarquia de grupos, e suporte a tipos de dados complexos (Rew *et al.*, 2015).

2.5.2. Satélites

Satélites são objectos artificiais ou naturais que orbitam um corpo celeste, como a Terra. O satélite natural mais conhecido é Lua. Já os satélites artificiais são objectos criados pelo homem e enviados ao espaço para diversas finalidades, incluindo comunicação, navegação, observação da Terra e pesquisa científica (Florenzano, 2008).

De acordo com Valery (2014), os satélites artificiais desempenham um papel fundamental na sociedade moderna, permitindo tecnologias como o GPS, transmissão de televisão, monitoramento ambiental e previsão do tempo. Eles podem ser classificados de várias formas, como por sua órbita (baixa, média ou geostacionária) ou pela sua função principal. Exemplos de satélites, Global Ocean Physics Reanalysis, Global Ocean Physics Analysis and Forecast, Multi Observation Global Ocean 3D Temperature Salinity Height, Arctic Ocean - High Resolution Sea Ice Information L3, entre outros.

2.5.3. Resolução Espacial

Resolução Espacial refere-se ao tamanho da menor unidade espacial que pode ser distinguida ou medida em um conjunto de dados. Ou seja, é a capacidade de um dado de representar detalhes no espaço. Geralmente expressa em unidades de distância, como metros (m), quilômetros (km), graus (para dados geográficos) ou em termos de área, como metros quadrados (m²) (Gonzalez e Woods, 2008).

2.5.4. Resolução Temporal

Resolução Temporal refere-se à frequência com que os dados são colectados ou a precisão com que as mudanças no tempo são registradas. É o intervalo de tempo entre as medições. Geralmente expressa

em unidades de tempo, como segundos (s), minutos (min), horas (h), dias, meses, anos ou em termos de frequência (por exemplo, dados diários, mensais, anuais) (Oppenheim e Willsky, 1997).

2.6. Métricas estatísticas

2.6.1. O coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento ou o r de Pearson é uma medida estatística que indica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas (Filho e Júnior, 2009). Este coeficiente, normalmente representado pela letra "r" assume apenas valores entre -1 e 1, onde:

$r = 1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta proporcionalmente).

$r = -1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis (quando uma variável aumenta, a outra sempre diminui).

$r = 0$ Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma outra dependência que seja "não linear". Assim, o resultado $r=0$ deve ser investigado por outros meios.

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Equação 1: Correlação de Pearson}$$

➤ Interpretação

- $|r| > 0,69$: correlação forte
- $0,3 < |r| \leq 0,69$: correlação moderada
- $|r| \leq 0,3$: correlação fraca

CAPITULO III: Material e Métodos

3. Metodologia

O presente estudo foi realizado no período de Setembro de 2024 a Julho de 2025. A pesquisa consistiu no impacto das mudanças climáticas na variação temporal da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono no Canal de Moçambique.

O estudo foi realizado em todo Canal de Moçambique. Os dados de Nitrato (NO_3^-), Sílica (Si), Produtividade Primária (PP), Dióxido de carbono (CO_2) e Temperatura Superficial do Mar (TSM) foram obtidos no Sistema de Serviço de Monitoramento do Ambiente Marinho Copernicus (CMEMS).

Os dados foram processados utilizando a linguagem de programação MATLAB. Para caracterizar a variação sazonal da PP, NO_3^- , Si, CO_2 e TSM em cada década foram produzidos mapas de distribuição temporal em três décadas ao longo de um período de 30 anos. Foram feitas análises sazonais para as três décadas, considerou-se duas estações do ano: verão e inverno. E para variação interanual foram feitas médias anuais ao longo dos 30 anos e de seguida foram produzidos gráficos de linhas. E fez-se a relação da PP, NO_3^- , Si e CO_2 com TSM usando o coeficiente de correlação de Person.

3.1. Descrição da Área de estudo

O Canal de Moçambique está situado entre a costa oriental da África e a Ilha de Madagáscar, situando-se no Sudoeste do Oceano Índico entre as latitudes 10° Sul a 26° Sul e longitudes 33° Este á 50° Este (Figura 1). Sendo a Costa Moçambicana a sua fronteira ocidental que é relativamente complexa, rica em ecossistema marinho e importante para a pescaria, recreativa, turística e navegação (Fernando, 2019). A circulação no canal de Moçambique é caracterizada por uma intensa actividade de vórtices de mesoescala (Halo *et al.*, 2014). Segundo Roberts *et al.* (2014) e Obura *et al.* (2018) os vórtices que se movem para Sul no lado ocidental do Canal de Moçambique são o principal mecanismo de fornecimento de nutrientes para as águas superficiais que de outro modo seriam oligotróficas e para além disso são um importante mecanismo para as trocas entre a plataforma e o oceano aberto.

As temperaturas e salinidades das massas de água encontradas no Canal de Moçambique variam entre 20°C e 30°C e entre 34 a 36 unidades de salinidade, respetivamente. A parte superior da coluna de água consiste de Águas de Superfície Equatoriais quentes, identificadas como águas relativamente doces, devido à elevada precipitação equatorial. A Água de Superfície Equatorial é transportada para o canal através da entrada ao Norte do Canal de Moçambique, como uma extensão da Corrente Equatorial Sul (Saetre e da Silva, 1984). A Água do Oceano Índico Equatorial (também denominada Água de Superfície Tropical) é muito encontrada nas partes norte e central do Cana

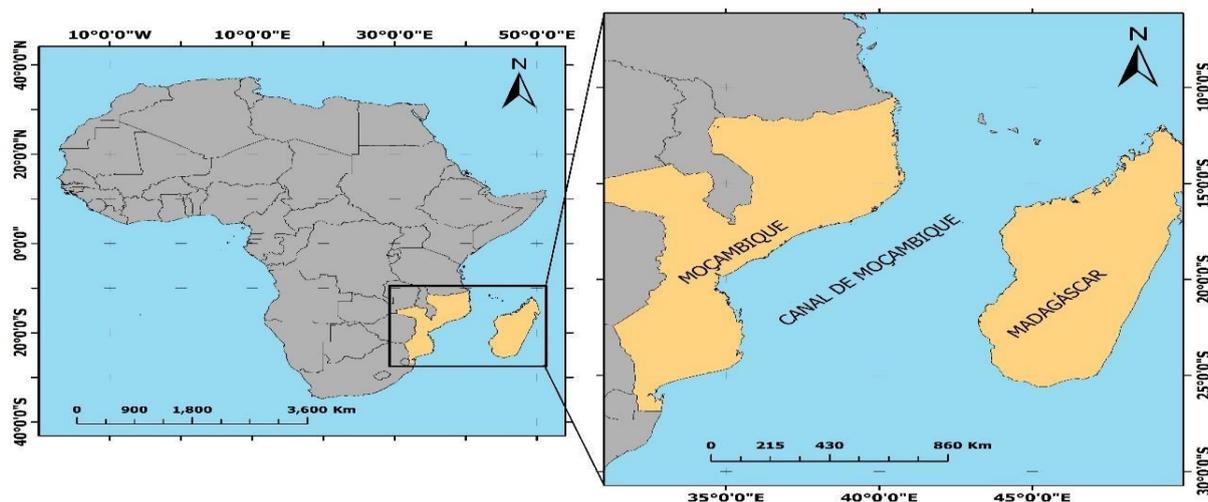


Figura 1: Localização geográfica do Canal Moçambique. **Fonte:** ArcGIS

3.2. Descrição de dados

No presente estudo foram utilizados dados de NO_3^- , Si, PP, CO_2 e TSM no Canal de Moçambique. Esses dados foram obtidos no formato netCDF-4, do satélite *Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast* e *Global Ocean Physics Analysis and Forecast* na plataforma *GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029* e *MyOcean_Copernicus*, disponibilizado pelo Sistema de Serviço de Monitoramento do Ambiente Marinho Copernicus (CMEMS) através do acesso online (<https://marine.copernicus.eu/>). Os dados, usados possuem uma resolução espacial-temporal de $0,25^\circ$ ($\sim 27,7$ km) (NO_3^- , Si, PP e CO_2) e $0,083^\circ$ (TSM) e mensal ao longo de um período de 30 anos de Janeiro de 1993 até Dezembro de 2022 (tabela 1).

Tabela 1: Descrição de dados

Parâmetro	Plataforma	Satélite, Sensor ou Modelo	Resolução	
			Temporal	Espacial
PP	CMEMS	Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast	Mensal	$0,25^\circ$
NO_3^-	CMEMS	Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast	Mensal	$0,25^\circ$
Si	CMEMS	Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast	Mensal	$0,25^\circ$
CO_2	CMEMS	Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast	Mensal	$0,25^\circ$
TSM	CMEMS	Global Ocean Physics Analysis and Forecast	Mensal	$0,083^\circ$

3.3. Processamento dos dados

Os dados foram processados utilizando a linguagem de programação MATLAB®, esse tem a capacidade de manipular facilmente o formato de dados netCDF-4. O método empregado envolveu a computação de fórmulas específicas para o MATLAB, visando produzir mapas que apresentassem médias sazonais.

Para caracterizar a variação sazonal da PP, NO_3^- , Si CO_2 e TSM em cada década (1993 - 2002; 2003 - 2012; 2013 - 2022) foram produzidos mapas de distribuição temporal em três décadas ao longo de um período de 30 anos. Foram feitas análises sazonais para três décadas, considerou-se duas estações do ano para cada década, seleccionando três meses para representar cada estação: Novembro, Dezembro e Janeiro para o verão porque apresentam maior pico de temperatura, e Maio, Junho e Julho para o inverno porque apresentam menor pico de temperatura. Essa abordagem permitiu uma compreensão simplificada das mudanças sazonais em cada década nos nutrientes, na produtividade primária e no dióxido de carbono ao longo dos 30 anos.

Para variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica, dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar foram feitas médias anuais ao longo dos 30 anos e de seguida foram produzidos gráficos de linhas, pois isso permitiu compreensão da variação da produtividade primária, nitrato, sílica, dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar ao longo dos 30 anos.

Para a relação da PP, NO_3^- , Si e CO_2 com TSM foram feitas médias anuais, em seguida foram produzidos gráficos de dispersão usando o coeficiente de correlação de Person.

CAPITULO IV: Resultados e Discussão

4. Resultados e Discussão

4.1. Resultados

4.1.1. Variação sazonal na concentração da produtividade primária, nitrato, sílica dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar em cada década (1993 - 2002; 2003 –2012; 2013 – 2022)

➤ Produtividade primária

A variação sazonal da produtividade primária em cada década no Canal de Moçambique está ilustrada na figura 2. A concentração da produtividade primária manteve-se constante em todas as décadas, entretanto, o verão apresentou maior concentração, enquanto que no inverno a concentração foi menor. Nas três décadas, a maior concentração da produtividade primária no verão ocorre mais a norte do Canal de Moçambique, na zona de Madagascar. O perfil da concentração da produtividade primária no inverno é similar ao do verão na medida em que apresenta maior valor no norte do Canal de Moçambique, na zona de Madagascar, porém apresenta também maior valor na zona centro, no Banco de Sofala.

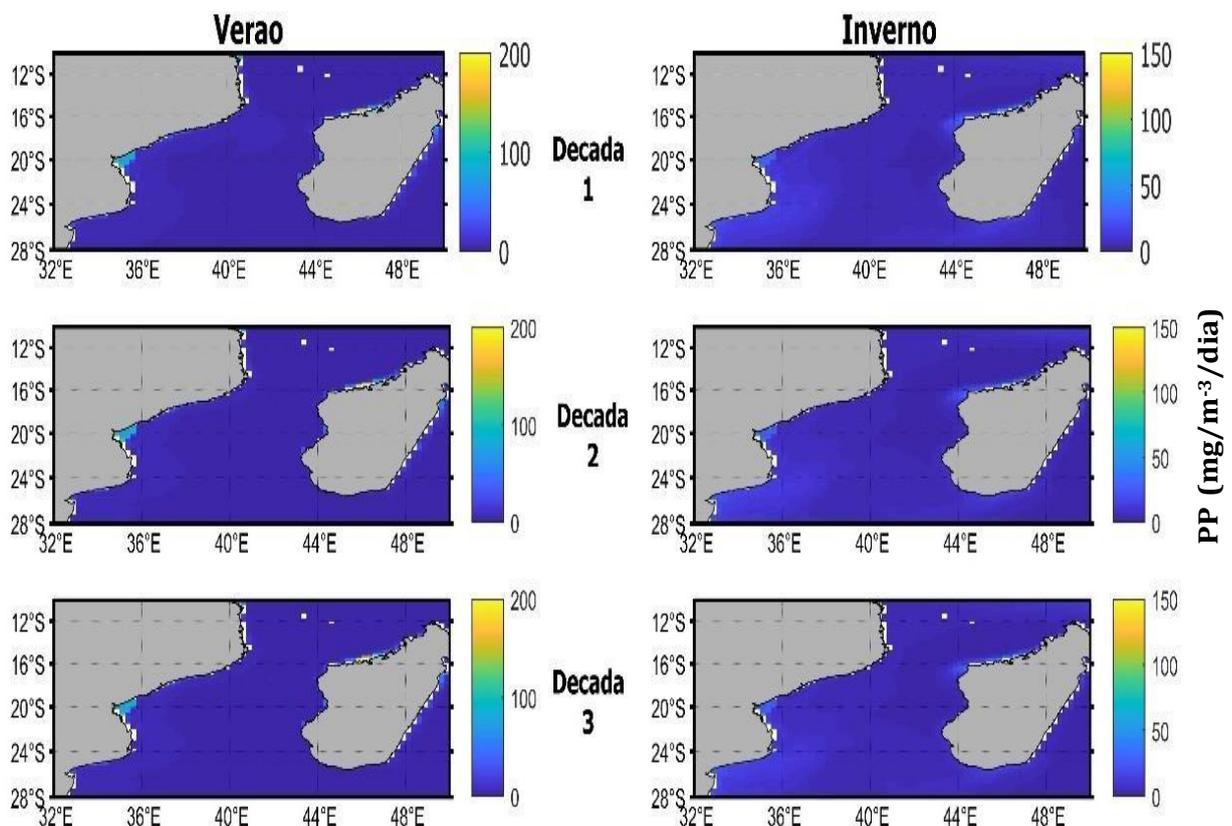


Figura 2: Variação sazonal da PP em cada década no Canal de Moçambique, nas três décadas, no verão a PP varia entre 0 e 200 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{dia}$ e no inverno varia entre 0 e $\sim 50 \text{ mg}/\text{m}^3/\text{dia}$.

➤ Nitrato

A variação sazonal do nitrato em cada década está ilustrada na figura 3. No verão, a primeira década apresentou uma menor concentração em relação a segunda década, a segunda década é maior em relação a terceira década. No inverno, a concentração do nitrato manteve-se constante em todas as décadas. Entretanto, em todas as décadas, o verão apresentou maior concentração em relação ao inverno. Nas três décadas a maior concentração de nitrato no verão ocorre mais na zona costeira a centro do Canal de Moçambique, Banco de Sofala. O mesmo acontece no inverno a maior concentração ocorre a centro do Canal de Moçambique, no Banco de Sofala.

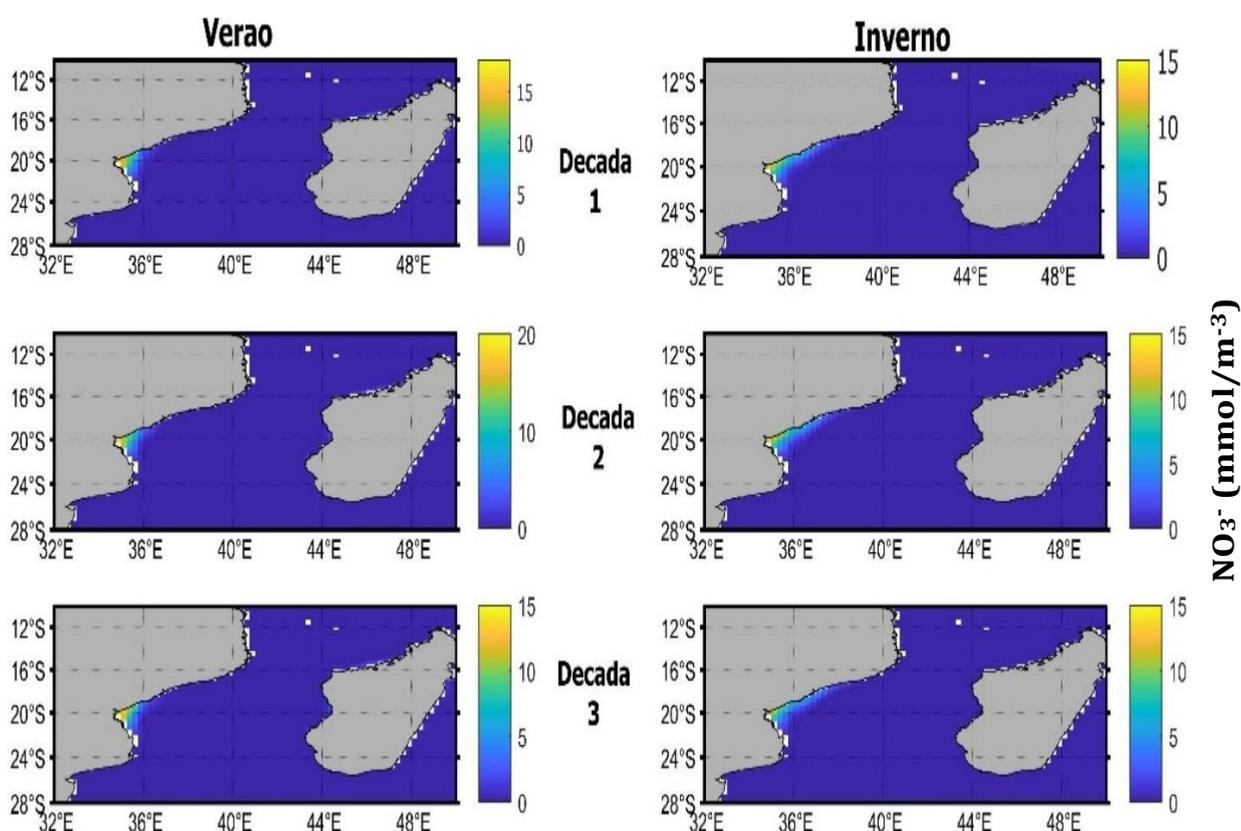


Figura 3: Variação sazonal de NO_3^- em cada década no Canal de Moçambique. No verão, a primeira década varia entre 0 e $\sim 18 \text{ mmol/m}^{-3}$, a segunda entre 0 e $\sim 20 \text{ mmol/m}^{-3}$ e terceira entre 0 e 15 mmol/m^{-3} . No inverno, nas três décadas varia entre 0 e 14 mmol/m^{-3} .

➤ Sílica

A variação sazonal da sílica em cada década está ilustrada na figura 4. A concentração da sílica no verão manteve-se constante em todas as décadas. Entretanto, no inverno houve variação, na primeira década o nitrato foi menor em relação a segunda, a segunda foi menor em relação a terceira década.

Portanto o verão apresentou maior concentração em todas as décadas, enquanto que no inverno a concentração foi menor primeira e segunda exceptuando a terceira década, que foi igual a concentração de todas as décadas do verão. Nas três décadas, a maior concentração da sílica no verão ocorre mais na zona costeira a centro do Canal de Moçambique, no Banco de Sofala. No inverno o perfil da concentração da sílica é similar ao do verão na medida em que apresenta maior concentração na zona costeira do centro do Canal de Moçambique, no Banco de Sofala.

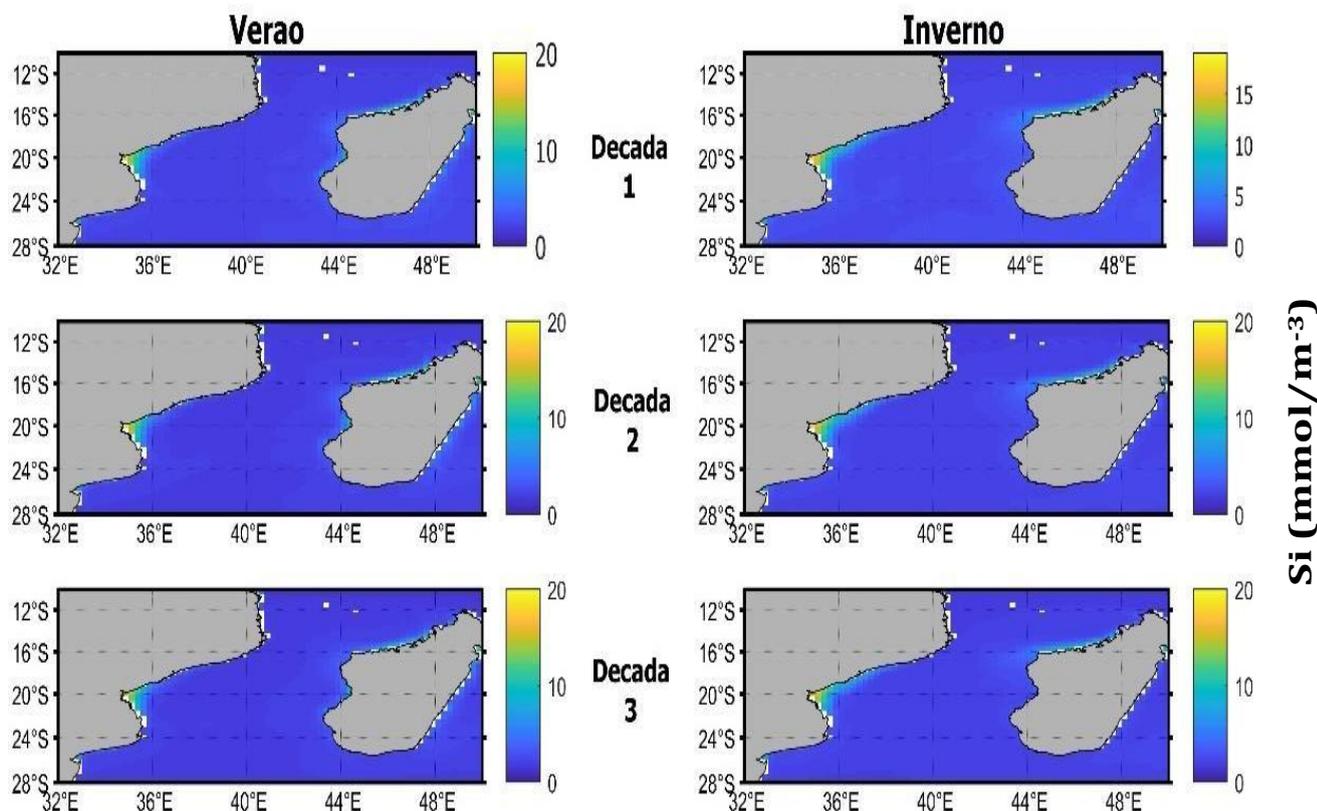


Figura 4: Variação sazonal da Si em cada década no Canal de Moçambique, em todas as décadas no verão varia entre 0 e 20 mmol/m⁻³. No inverno, a primeira década varia entre 0 e ~18 mmol/m⁻³, a segunda entre 0 e ~20 mmol/m⁻³ e a terceira entre 0 e 20 mmol/m⁻³.

➤ **Dióxido de carbono**

A variação sazonal do dióxido de carbono em cada década está ilustrada na figura 5. Houve variação da concentração do dióxido de carbono, com um aumento ao longo das três décadas. No verão, a primeira década foi menor em relação a segunda e terceira década. No inverno, a primeira década foi menor em relação a segunda década, essa por sua vez foi menor em relação a terceira década. Entretanto, nas três décadas, a concentração no verão foi maior em relação ao inverno. No verão a maior concentração do dióxido de carbono nas três décadas ocorre mais na zona costeira do centro do Canal de Moçambique, no Banco de Sofala. Enquanto que no inverno, a primeira e a segunda

década a maior concentração ocorre mais a norte do Canal de Moçambique e na terceira década a maior concentração ocorre na região centro do Canal de Moçambique.

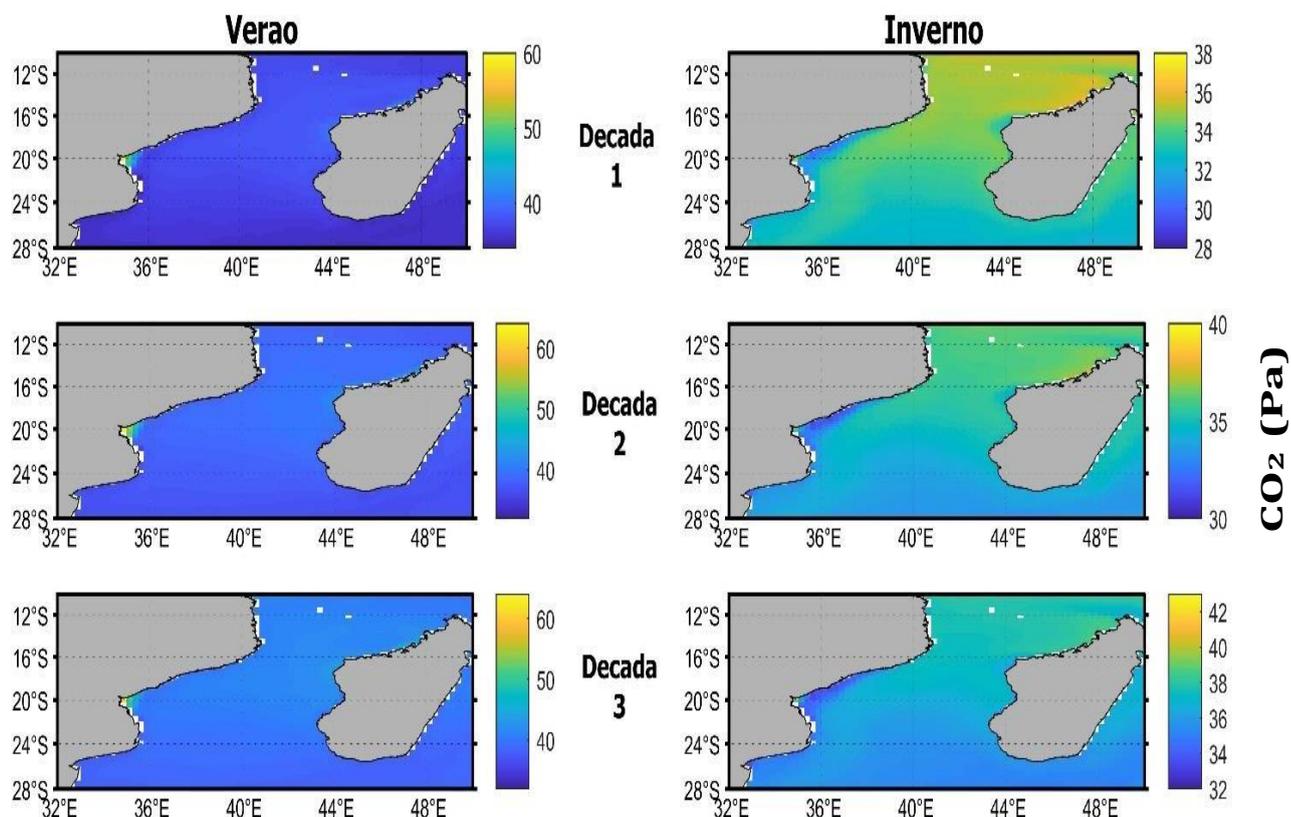


Figura 5: Variação sazonal de CO₂ em cada década no Canal de Moçambique. No verão, a primeira década varia entre 32 e 60 Pa; a segunda e terceira entre 32 e ~65 Pa. No inverno, a primeira década varia entre 28 e ~38 Pa, a segunda entre 30 e ~40 Pa, e a terceira entre 32 e 42 Pa.

➤ Temperatura Superficial do Mar

A variação sazonal da Temperatura Superficial do Mar em cada década está ilustrada na figura 6. Houve variação da Temperatura Superficial do Mar, com um aumento ao longo das três décadas. No verão, a primeira década foi menor em relação a segunda e terceira década. No inverno, a primeira e segunda década foi menor em relação a terceira década. Entretanto, no verão a TSM foi maior, enquanto que no inverno foi menor. No verão a maior Temperatura Superficial do Mar nas três décadas ocorreu mais nas regiões norte e um pouco a centro do Canal de Moçambique. No inverno o perfil da temperatura superficial do mar foi similar ao do verão, na medida em que a maior temperatura ocorre na região norte e um pouco a centro do Canal de Moçambique.

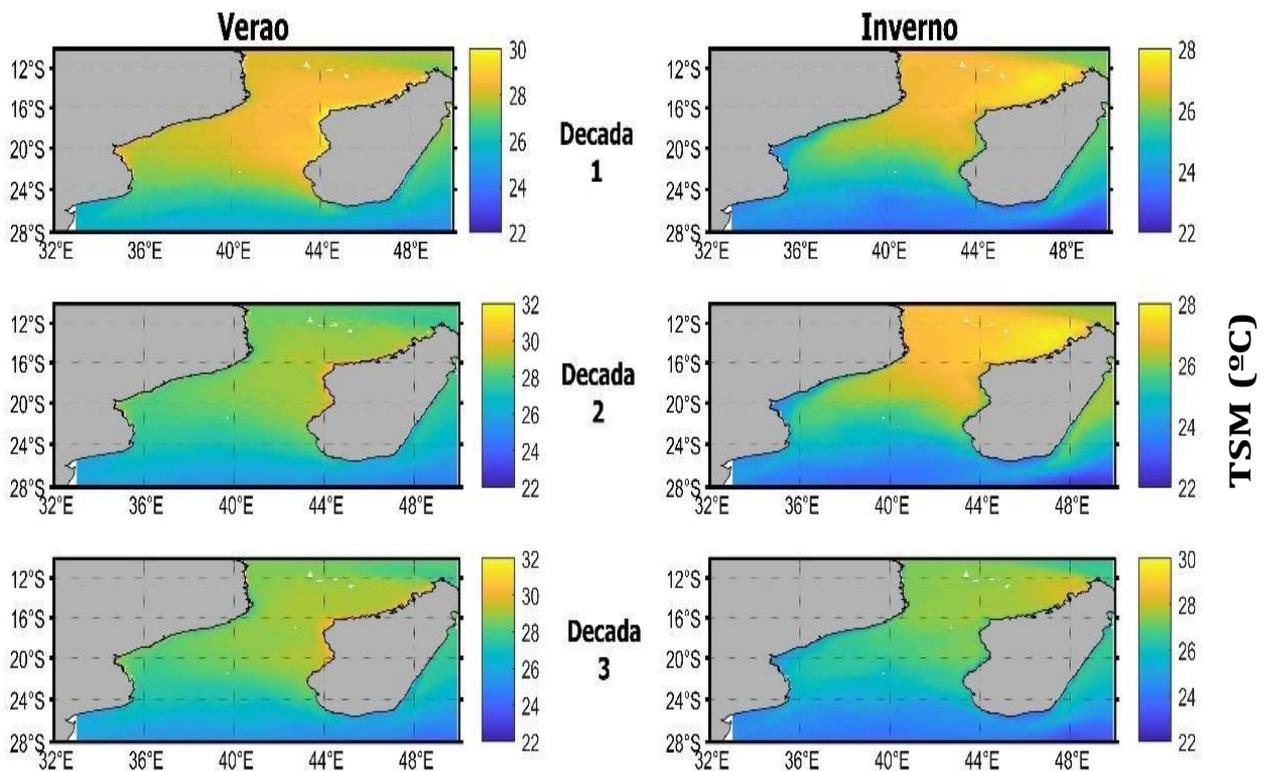


Figura 6: Variação sazonal de TSM em cada década no Canal de Moçambique. No verão, a primeira década varia entre 22 e 30°C, a segunda e terceira década varia entre 22 e 32°C. No inverno, a primeira e segunda década varia entre 22 e ~28°C e a terceira entre 22 e ~30°C

4.1.2. Variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica, dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar

A variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica, dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar está ilustrada na figura 7. A produtividade primária apresentou uma variação interanual não uniforme, com uma tendência de decréscimo ao longo dos 30 anos. Entretanto no ano de 1993 a 1994 houve um aumento, de 1994 a 1997 houve diminuição, de 1997 a 1998 houve um aumento, de 1998 a 2006 a variação foi quase constante, de 2006 a 2007 houve diminuição, de 2007 a 2008 houve diminuição, de 2008 a 2011 houve diminuição, de 2011 a 2013 houve aumento, de 2013 em diante há uma tendência de decréscimo. A produtividade primária apresentou pico máximo no ano de 1994 que foi de $\sim 7 \text{ mg/m}^3/\text{dia}$ e pico mínimo no ano de 2011 que foi de $4,3 \text{ mg/m}^3/\text{dia}$ (Figura 7.A).

O nitrato apresentou uma variação interanual não uniforme, a linha de tendência indica uma ligeira queda ao longo dos 30 anos, mas as variações interanuais são mais acentuadas do que a tendência geral. No ano de 1993 a 1999 houve diminuição com um ligeiro aumento no ano de 1996 e 1997, de 1999 até 2002 houve um aumento, de 2002 a 2011 houve uma diminuição com um ligeiro aumento

em 2008, de 2011 a 2019 houve diminuição, 2019 em diante a tendência é de crescimento. O nitrato apresentou o seu pico máximo no ano de 2002 que foi de 0,2 mmol/m⁻³ e o seu pico mínimo no ano de 2019 que foi de 0,13 mmol/m⁻³ (Figura 7.B).

A sílica apresentou uma variação interanual uniforme com um perfil decrescente e apresentou uma tendência de diminuição ao longo dos 30 anos. A sílica apresentou o seu pico máximo no ano de 1993 que foi de 3,5 mmol/m⁻³ e seu pico mínimo no ano de 2013 que foi de 2,21 mmol/m⁻³ (Figura 7.C).

O dióxido de carbono apresentou uma variação uniforme com um perfil crescente e apresentou uma tendência crescente ao longo dos 30 anos. O dióxido de carbono apresentou o seu pico máximo no ano de 2022 que foi de ~40 Pa e seu pico mínimo no ano de 1996 que foi de 34 Pa (Figura 7.D).

A Temperatura Superficial do Mar apresentou uma variação não uniforme, com uma tendência crescente ao longo dos 30 anos. A Temperatura Superficial do Mar apresentou o seu pico máximo no ano de 2019, que foi de 26,83°C e seu pico mínimo no ano de 1994, com valor de 25,9°C (7.E).

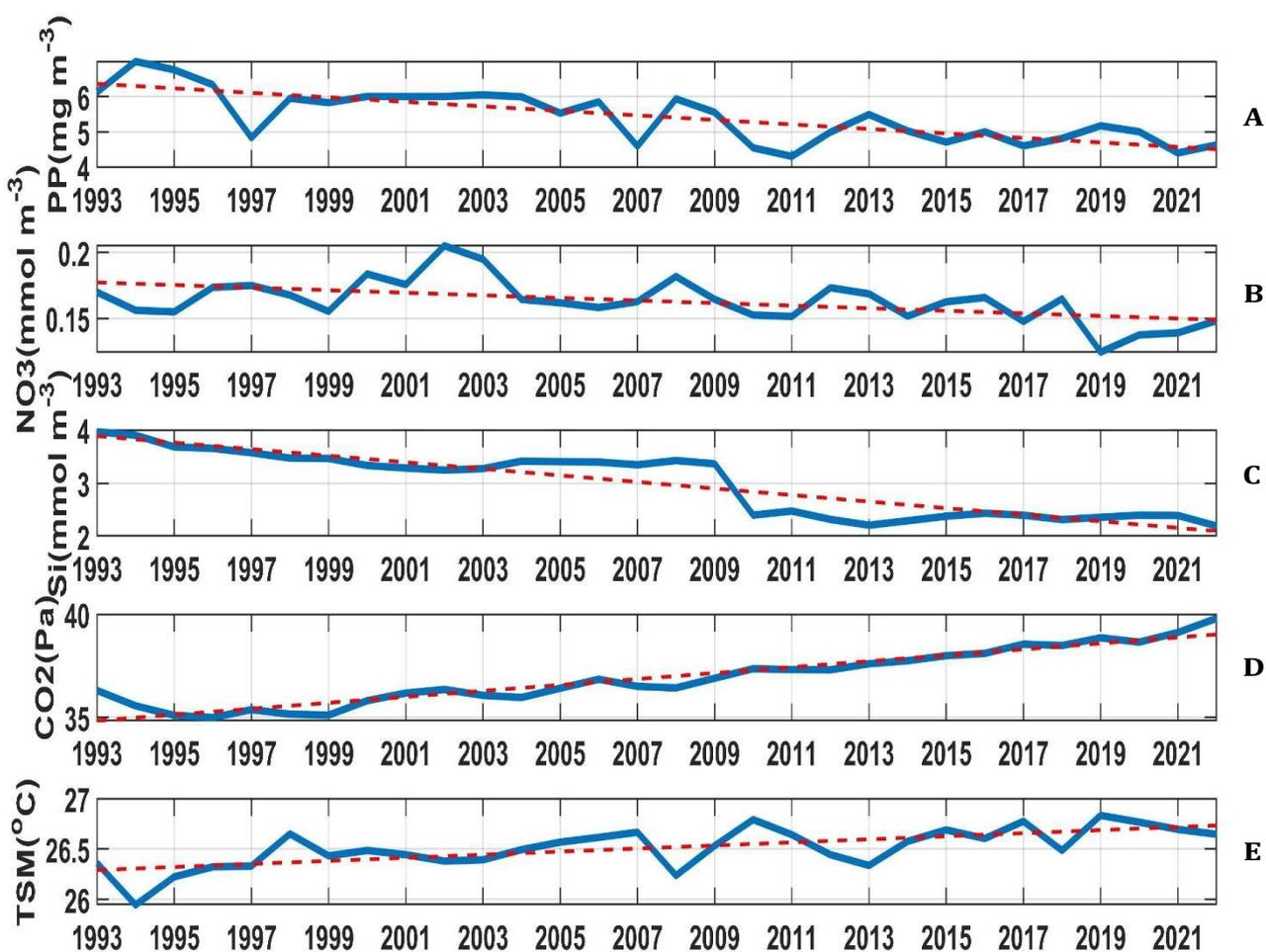


Figura 7: Variação interanual da concentração da produtividade primária, nitrato, sílica dióxido de carbono e Temperatura Superficial do Mar. A produtividade primária varia de 4,3 mg/m⁻³/dia a ~7

mg/m³/dia (7.A). O nitrato varia de 0,13 mmol/m³ a 0,2 mmol/m³(7.B). A sílica varia de 2,21 mmol/m³ a 3,5 mmol/m³(7.C). O dióxido de carbono varia de 34 Pa a ~40 Pa (7.D). A Temperatura Superficial do Mar varia de 25,9°C a 26,8°C (7.E).

4.1.3. Relação entre concentrações da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono com Temperatura Superficial do Mar.

A relação entre TSM e PP ilustrada na figura 8.A é um gráfico de dispersão, que mostra uma correlação negativa forte r (-0,74). Isso indica que, à medida que a TSM aumenta, a PP tende a diminuir. A linha de regressão tem uma inclinação negativa acentuada, reforçando essa relação inversa. O R^2 (0,548) significa que aproximadamente 55% da variância em PP pode ser explicada pela variância em TSM.

A relação entre TSM e NO₃⁻ ilustrada na figura 8.B representa um gráfico de dispersão com linhas de regressão linear, o valor de r (-0,53) representa uma correlação negativa moderada. A linha de regressão tem uma inclinação negativa suave, indicando uma tendência de diminuição de NO₃⁻ com o aumento de TSM, mas com muita dispersão dos pontos. Um R^2 (0,279) indica que apenas 28% da variância em NO₃⁻ é explicada pela variância em TSM.

A relação entre TSM e Si ilustrada na figura 8.C mostra gráfico de dispersão, o valor de r (-0,62) mostra uma correlação negativa moderada entre TSM e Si. A linha de regressão tem uma inclinação negativa, mostrando uma tendência de diminuição de Si com o aumento de TSM. O valor R^2 (0,388) indica que aproximadamente 39% da variância em Si pode ser explicada pela variância em TSM.

A relação entre TSM e CO₂ ilustrada na figura 8.D representa um gráfico de dispersão com linhas de regressão linear, o valor de r (0,63) representa uma correlação positiva moderada, indicando uma tendência de aumento de CO₂ com o aumento de TSM. O valor R^2 (0,402) indica que aproximadamente 40% da variância em CO₂ pode ser explicada pela variância em TSM.

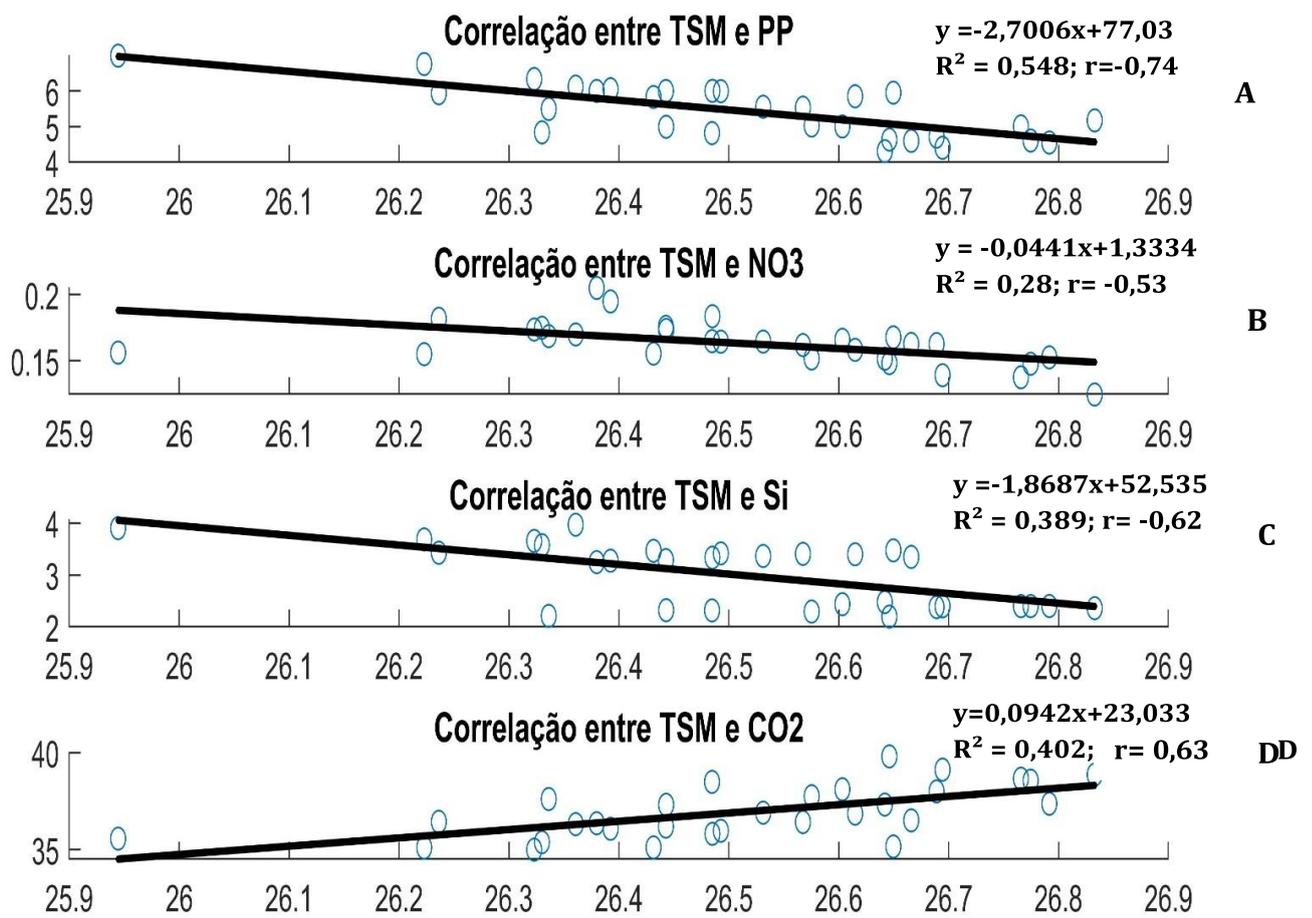


Figura 8: Relação entre concentração: TSM com PP (8.A), TSM com NO₃⁻ (8.B), TSM com Si (8.C) e TSM com CO₂ (8.D).

4.2. Discussão

Os resultados obtidos neste estudo revelam uma variação significativa da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono no Canal de Moçambique, com diferenças sazonais e interanuais marcadas. A produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono apresentaram maiores concentrações no verão, devido ao aumento da radiação solar e da temperatura, que intensificam os processos fotossintéticos e o aumento da precipitação e entrada de nutrientes (Falkowski *et al.*, 1998), entretanto no inverno os valores foram significativamente menores, devido a redução da radiação solar e temperatura, menor circulação de nutrientes para a superfície. Essas flutuações são directamente influenciadas pela Temperatura Superficial do Mar (TSM) e padrões de circulação oceânica.

A alta concentração da produtividade primária observada no verão, na região norte do Canal de Moçambique especialmente na zona de Madagáscar, é influenciada por ventos que podem alterar as correntes oceânicas e os padrões de circulação da água. Essas mudanças podem resultar em fenómenos como o upwelling, que traz águas ricas em nutrientes como nitrato e sílica, essenciais para o crescimento do fitoplâncton (Halo *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2014). Segundo Follows *et al.* (2007) e McClanahan *et al.* (2008), afirmam que essa área apresenta um aumento significativo na produtividade primária durante o verão, pois é impulsionado pela combinação de ventos alísios e correntes marítimas que favorecem a entrada de nutrientes e, conseqüentemente, promovem a alta produtividade biológica. No inverno, a maior concentração de produtividade primária no Canal de Moçambique na região norte e centro, é devido às condições favoráveis de temperaturas mais amenas e circulação de correntes marítimas que promovem o aumento da disponibilidade de nutrientes na coluna de água. Essas condições estimulam o crescimento de fitoplâncton, base da cadeia alimentar marinha, resultando em maior produtividade primária nessa estação. Estudos como os de Colleoni *et al.* (2018) destacam que a dinâmica de nutrientes e as correntes oceânicas durante o inverno favorecem essa concentração de actividade biológica na região.

A alta concentração dos nutrientes (sílica e nitrato) observada no verão na região central do Canal de Moçambique, especialmente no banco de Sofala, é impulsionada pelo aumento das chuvas, especialmente durante a estação chuvosa. Essa precipitação intensifica o fluxo de rios, sobretudo o Rio Sofala, que desagua na área e transporta grandes volumes de nutrientes (Mendes *et al.*, 2018). No inverno, a maior concentração dos nutrientes observada na região central é influenciada por ventos de sudoeste, que promovem o aumento da circulação marítima na região. Essas condições favorecem a mistura das camadas superficiais do oceano, trazendo nutrientes profundos para a superfície (Malan *et al.*, 2004). A temperatura mais baixa do inverno aumenta a estabilidade da coluna de água,

permitindo o desenvolvimento de processos de upwelling (ressurgência), que elevam nutrientes do fundo do mar para as camadas superiores (Lutjeharms, 2006).

A alta concentração do dióxido de carbono observada no verão na região central do Canal de Moçambique, especialmente no banco de Sofala deve-se ao aumento na actividade biológica, incluindo a respiração de organismos marinhos, que libera CO₂ na água, durante o verão. Além disso, a decomposição de matéria orgânica transportada por rios e correntes costeiras também aumenta a quantidade de CO₂ dissolvido na água (Falkowski *et al.*, 1998). O banco de Sofala, por estar próximo às correntes que trazem nutrientes, pode experimentar uma maior respiração e decomposição, elevando os níveis de CO₂. O Canal de Moçambique é influenciado por correntes que movimentam água entre o oceano aberto e a costa. No verão, as correntes costeiras podem transportar água com maiores concentrações de CO₂ proveniente de áreas mais profundas ou de regiões com maior actividade biológica, contribuindo para o aumento do gás na superfície nessa região (Schmittner *et al.*, 2005). Estudos indicam que a circulação na região do banco de Sofala favorece a retenção de CO₂ dissolvido na água (Muller *et al.*, 2014).

A redução gradual na concentração de sílica e nitrato ao longo das décadas reflecte os impactos cumulativos das mudanças climáticas, pois, a TSM, que é um dos indicadores das mudanças climáticas apresentou uma tendência de aumento ao longo de 30 anos. Essa relação inversa é explicada pelo facto de elevadas temperaturas causarem maior estratificação da coluna de água, dificultando a mistura vertical e o aporte de nutrientes das camadas mais profundas para a superfície (Beaugrand, 2009). Essa tendência é preocupante, pois afecta directamente a biodiversidade marinha e a sustentabilidade dos ecossistemas locais (IPCC, 2021).

Estudos anteriores em regiões tropicais e subtropicais apresentam padrões semelhantes na maior concentração de produtividade primária no verão. Por exemplo, Falkowski e Raven (2007) observaram que a produtividade primária em zonas de ressurgência está directamente ligada à disponibilidade de nutrientes, controlada por processos físicos como correntes e estratificação. No Oceano Índico, Le Quéré *et al.* (2005) demonstraram que as alterações climáticas estão impactando negativamente a circulação oceânica, reduzindo a disponibilidade de nitrato e sílica. No entanto, o Canal de Moçambique destaca-se pela influência dos vórtices, que desempenham um papel importante na manutenção da produtividade durante o verão (Barbat *et al.*, 2015).

Roberts *et al.* (2014) ressalta que os vórtices são mecanismos importantes para a troca de nutrientes entre as águas costeiras e oceânicas. Essa dinâmica única foi confirmada neste estudo, com os maiores picos de produtividade primária observados nas zonas norte e central do Canal, próximas ao Banco de Sofala, onde os vórtices são mais intensos.

Estudos conduzidos por Nelson *et al.* (1995) no Oceano Pacífico mostraram padrões similares de redução de sílica em áreas estratificadas, confirmando a relevância desse mecanismo global. No entanto, os aumentos interanuais do nitrato, observados esporadicamente neste estudo, são menos comuns em outros sistemas tropicais, sugerindo dinâmicas regionais peculiares no Canal de Moçambique.

A diminuição da produtividade primária ao longo dos anos sugere uma redução na capacidade do ecossistema de produzir biomassa, o que pode ter consequências negativas para a cadeia alimentar. A diminuição concomitante de nitrato e sílica, nutrientes essenciais para o crescimento de fitoplâncton, pode ser uma das causas dessa redução na produtividade primária. A menor disponibilidade de nutrientes limita o crescimento do fitoplâncton, afetando a base da cadeia alimentar e, conseqüentemente, a produtividade primária.

O aumento gradual do dióxido de carbono ao longo dos anos, reflecte o impacto das mudanças climáticas, pois os níveis de emissões do dióxido de carbono antropogênicos têm aumentado na atmosfera com tempo, influenciando na maior concentração no oceano devido a interface oceano-atmosfera.

Os padrões observados neste estudo destacam os impactos das mudanças climáticas na variação da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido de carbono. A redução na concentração de nitrato e sílica ao longo das décadas pode levar a desequilíbrios ecológicos, como a proliferação de espécies oportunistas em detrimento de espécies mais sensíveis, causando impactos na biodiversidade (Henson *et al.*, 2017). Além disso, a redução da produtividade primária pode comprometer a segurança alimentar das comunidades que dependem directamente dos recursos marinhos (Santos *et al.*, 2023).

Além disso, a elevação do dióxido de carbono atmosférico, absorvido pelos oceanos, intensifica a acidificação marinha, afectando a disponibilidade de carbonatos necessários para organismos calcários. Macuacua, (2023) e Kleypas, (2009) destacaram como essa mudança química que pode influenciar negativamente a biodiversidade e a produtividade primária, como também observado neste estudo.

O aumento da Temperatura Superficial do Mar (TSM) observado ao longo das décadas, conforme identificado neste estudo e corroborado por Macuacua (2023) e Manuari (2024), está associado à intensificação da estratificação da coluna de água. Essa estratificação dificulta o transporte vertical de nutrientes como sílica e nitrato, essenciais para a produtividade primária, limitando o crescimento de organismos como as diatomáceas, conforme destacado por Tréguer *et al.* (1995). Este fenômeno foi observado em vários sistemas costeiros e oceânicos globais, assim como Oceano Índico.

A relação entre produtividade primária e Temperatura Superficial do Mar (TSM) apresentou uma correlação negativa forte. Em faixas ótimas de temperatura, a produtividade primária foi maximizada devido ao aumento da taxa metabólica e da eficiência fotossintética do fitoplâncton. No entanto, temperaturas superiores a essa faixa resultaram em uma diminuição na produtividade, possivelmente devido à desnaturação de enzimas fotossintéticas e à redução na disponibilidade de nutrientes, como sugerido por Behrenfeld *et al.* (2006).

A relação entre nitrato e Temperatura Superficial do Mar (TSM) apresentou uma correlação negativo moderada. Altas temperaturas promoveram a estratificação da coluna de água, limitando a ressurgência de águas profundas ricas em nitrato para a superfície. Isso é consistente com estudos que mostram que o aumento da TSM reduz a disponibilidade de nutrientes essenciais, impactando a produtividade primária em ecossistemas marinhos tropicais (Moore *et al.*, 2008).

A relação entre sílica e Temperatura Superficial do Mar (TSM) apresentou uma correlação negativa moderada, reflectindo os impactos da estratificação da coluna de água em ambientes tropicais. À medida que a TSM aumentou, a ressurgência de sílica foi significativamente reduzida, especialmente em áreas mais profundas. Esse padrão foi amplificado pelo facto de que a sílica, essencial para diatomáceas, já estava em declínio devido a factores climáticos de longo prazo, conforme descrito por Nelson *et al.* (1995).

Estudos como de Takahashi *et al.*, (2009); Le Quéré *et al.* (2018) mostraram uma correlação negativa entre Temperatura Superficial do Mar e dióxido de carbono, ou seja, uma relação inversa, o aumento da Temperatura Superficial do Mar reduz a solubilidade do dióxido de carbono na água, reduzindo a sua concentração na água. No entanto, a correlação positiva moderada observado esporadicamente neste estudo, a relação Temperatura Superficial do Mar e dióxido de carbono pode variar em diferentes regiões devido a diferentes factores como actividade biológica (fotossíntese e respiração), circulação oceânica e mistura de água (Falkowski *et al.*, 1998).

CAPITULO V: Conclusões e Recomendações

5. Conclusões e Recomendações

5.1. Conclusão

No presente estudo conclui-se que:

As concentrações da produtividade primária, nitrato, sílica, dióxido de carbono e Temperatura Superficial nas três décadas são maiores no verão e menores no inverno, excepto para o Si, que apresentou concentrações iguais na terceira década. A PP manteve-se constantes em todas as décadas. No verão, o NO_3^- variou, com maior concentração na segunda década em comparação com a primeira e terceira e no inverno as concentrações mantiveram-se constante ao longo das décadas. A Si no verão manteve-se constante e no inverno, houve variação, com maior concentração na terceira década em relação as duas primeiras. Houve variação do CO_2 e da TSM ao longo das décadas, no verão, a maior concentração ocorreu na segunda e terceira década em relação a primeira e no inverno, a maior concentração ocorreu na terceira década em relação as duas primeiras décadas.

A produtividade primária e o nitrato apresentaram variações interanuais não uniformes com uma tendência decrescente, atingindo picos máximos no ano de 1994 e 2002 respectivamente. A sílica apresentou uma variação interanual uniforme com uma tendência decrescente, com o pico máximo no ano de 1993. O dióxido de carbono apresentou uma variação interanual uniforme com uma tendência crescente, com o pico máximo no ano de 2022. E a Temperatura Superficial do Mar apresentou uma variação interanual não uniforme com uma tendência crescente, com o pico máximo no ano de 2020.

A Temperatura Superficial do Mar e a produtividade primária apresentaram uma correlação negativa forte, a Temperatura Superficial do Mar com nitrato e sílica apresentaram uma correlação negativa moderada, a Temperatura Superficial do Mar e o dióxido de carbono apresentaram uma correlação positiva moderada.

5.2. Recomendação

- Recomenda-se a implementação de estratégias de monitoramento contínuo dos parâmetros em estudo.
- Recomenda-se o uso de tecnologias de sensoriamento remoto e modelos para auxiliar na identificação de tendências futuras e na formulação de políticas de gestão sustentável.
- Recomenda-se que se faça um estudo sobre outros factores climáticos que influenciam na variação da produtividade primária, nitrato, sílica e dióxido do carbono no Canal de Moçambique

6. Referências bibliográficas

1. Antônio, J. (2023). Implicações das Mudanças climáticas nas urbanas. *Revista Ciências Humanas*, 16 (1), 45-60
2. Armengol, L., Calbet, A., Franchy, G., Rodríguez-Santos, A., & Hernández-León, S. (2019). Planktonic food web structure and trophic transfer efficiency along a productivity gradient in the tropical and subtropical Atlantic Ocean. *Scientific reports*, 9 (1), 1-19.
3. Barbet, D. G., Hop, H., Mundy, C., Else, B., Dmitrenco, I. A., Tremblay, J.-E., Ehn, J. K., Assmy, P., Daase, M., Candleish, M. L., & Rysgaard, S. (2015). Implicações físicas, biológicas e biogeoquímicas selecionadas de uma zona de gelo Marginal do Ártico em rápida mudança. *Progresso em Oceanografia*, 122-150.
4. Bauer, J. E., & Bianchi, T. S. (2011). Ciclagem e transformação do carbono orgânico dissolvido. *Tratado sobre ciências estuarinas e costeira*, 5, 7-67.
5. Beaugrand, G. (2009). Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 80(1–2), 135-148.
6. Behrenfeld, M. J., O'malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., Milligan, A. J., Falkowski, P. G., Letelier, R. M., Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444, 752–755.
7. Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., McClain, C. L., Feldman, G. C., Los, S. O., Tucker, C. J., ... Pollack, N. H. (2001). Biospheric primary production during an ENSO transition. *Science*.
8. Berman-Frank, I., Quigg, A., Finkel, Z. V., Irwin, A. J., & Haramaty, L. (2007). Estratégias de fixação de nitrogênio e requisitos de Fe em cianobactérias. *Limnologia e Oceanografia*, 52 (5), 2260-2269.
9. Brewer, P. G., & Hester, K. (2009). Ocean acidification and the increasing transparency of the ocean to low-frequency sound. *Oceanography* 22 (4), 86–93.
10. Brown, J. H., Gillooly, J. F., Allen, A. P., Savage, V. M., & West, G. B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 85(10), 2058-2068.
11. Canfield, D. E., Thamdrup, B., & Thamdrup, M. (2010). The anaerobic oxidation of methane in marine sediments. *Annual Review of Microbiology*, 64(1), 569-592.
12. Castello, J.P. & Krug, L.C. 2015. Introdução às Ciências do Mar. Ed. Textos, Pelotas, 602.
13. Cole, J. J., & Caraco, N. F. (2001). Emissões de Oxido Nitroso (N₂O) de um rio de água doce de mare, o rio Hudson, Nova York. *Ciência e tecnologia ambiental* 35 (6), 991-996.
14. Colleoni, F., et al. (2018). Seasonal Variability of Primary Production in the Mozambique Channel. *Journal of Marine Systems*.

15. Conjo, A., et al. (2021). O papel da mídia na divulgação de informação sobre mudanças climáticas em Moçambique. *Revista Ibero-Americana de Humanidade Ciências e Educação*. 7(11), 1644-165.
16. Correll, D. L. (1985). *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. John Wiley & Sons.
17. Cullen, J. J., & Boyd, P. W. (2008). Prever e verificar as consequências intencionais e não intencionais da fertilização oceânica em larga escala com ferro. *Ecologia Marinha Progress Series*, 364, 295-301.
18. Cutrim, M. V. J., Ferreira, F. S., Santos, A. K. D., Cavalcanti, L. F., Araújo, B. O., Azevedo-Cutrim, A. C. G., Furtado, J. A., Oliveira, A. L. L. (2019). Trophic state of an urban coastal lagoon (northern Brazil), seasonal variation of the phytoplankton community and environmental variables. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 216, 98-109.
19. Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 322 (5898), 1528-1529.
20. Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192.
21. Dos Santos, A. S. (2020). Distribuição espaço temporal dos parâmetros abióticos e bióticos em um Estuário Amazônico (Brasil). *Arquivos de Ciências do Mar*, 53 (1).
22. Dugdale, R. C. J. (1967). Limitação de nutrientes no mar: dinâmica, identificação e significado. *Limnologia e oceanografia* 12 (4), 685-695.
23. Epley, R. W. (1972). Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*, 70 (4), 1063-1085.
24. Esteves, F. A. (2011). *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência.
25. Falkowski, P. G., & Raven, J. A. (2007). *Aquatic photosynthesis* (2^a ed.). Princeton University Press.
26. Falkowski, P. G., Barber, R. T., & Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281 (5374), 200-206.
27. Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., & Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305, 362-366.
28. Fernando, L. R., (2019). Análise das correntes à superfície na região norte do Canal de Moçambique. Monografia para a Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia. Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras.
29. Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237-240.
30. Filho, D. B., & Júnior, J. A. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18 (1).

31. Filho, N. E. M. (2009). Caracterização química da matéria orgânica nos sedimentos do solo do manguezal e dinâmica de nutrientes nas águas superficiais e intersticiais no médio estuarino do rio Paciência em Iguaíba – Paço do Lumiar. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.
32. Florenzano, T. G. (2008). Os Satélites e Suas Aplicações. São Paulo. 12, 243-630.
33. Follows, M., et al. (2007). The role of upwelling in the productivity of the Mozambique Channel. *Journal of Marine Systems*, 66 (1-4), 1-15.
34. Franco, V. P. C. (2007). Produtividade primária da zona costeira adjacente aos estuários do Tejo e Sado. PQDT-Global.
35. Gerrison, T. J. (2019). *Fundamentos de Oceanografia* (4ª ed.). São Paulo: Cengage Learning.
36. Gomes, H. R., Azevedo, B. F., & Barbosa, A. S. (2018). The influence of riverine nutrients in niche partitioning of phytoplankton communities—a contrast between the Amazon River Plume and the ChangJiang (Yangtze) River diluted water of the East China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 5, 343.
37. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). *Digital Image Processing* (3rd ed.). Pearson Education.
38. Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Lough, J. M., Gruber, N., & Sarmiento, J. L. (1997). Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 235-266.
39. Halo, I., Backeberg, B., Penven, P., Ansoerge, I., Reason, C., & Ullgren, J. E. (2014). Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 100, 38-53.
40. Harley, C. D. G., Hughes, A. R., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., & Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9, 228–241.
41. Henson, S. A., Beaulieu, C., Ilvina, T., John, J. G., Long, M. (2017). Rápida emergência das alterações climáticas nos motores ambientais dos ecossistemas marinhos. *Comunicações da Natureza*, 8 (1), 14682.
42. Hoegh-Guldberg, O. (2011). The Impact of Climate Change on Coral Reef Ecosystems. In: Dubinsky, Z.; Stambler, N. (Eds.). *Coral Reefs: an ecosystem in transition*. Netherlands.
43. Howarth, R. W. (2008). Coastal nitrogen pollution: a review of sources and trends globally. *Estuarine, coastal and shelf science*, 78 (4), 611-626.
44. Huete, A. R., Jackson, R. D., Posto, D. F. (1985). Resposta espectral de uma copa de planta com diferentes origens de solo. *Sensoriamento remoto do ambiente*, 17 (1), 37-53.
45. Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., & Huthnance, J. M. (1995). *Physical processes in the coastal zone*. Cambridge University Press.

46. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
47. IPCC, (2021). *Mudanças climáticas 2021 – A base da ciência física*. *Interação* 49(4), 44-45
48. IPCC, (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
49. Júlio, T. (2023). *Desafios da agenda climática em Moçambique: uma abordagem a partir da dimensão do currículo escolar*. *Delos Desenvolvimento Local Sustentável*, 16 (50), 1-15.
50. Kaiser, J., Lamy, F., & Hebbeln, D. (2005). *Um registro de temperatura da superfície do mar de 70 mil anos no sul do Chile (Programa de Perfuração Oceânica, Local 1233)*. *Paleoceanografia*, 20 (4).
51. Kleypas, J. A., e Yates, K. K. (2009). *Coral reefs and ocean acidification*.
52. Le Quéré, C., et al., (2005). *Ecosystem effects of ocean acidification on marine plankton*. *Science*, 308 (5728), 1635-1637.
53. Le Quéré, C., et al. (2018). *Global Carbon Budget 2018*. *Earth System Science Data*, 10 (4), 2141-2194.
54. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. In Wiley, 53 (9).
55. Lutjeharms, J. R. E. (2006). "The Mozambique Channel: Circulation, Water Masses and Hydrography." *South African Journal of Science*.
56. Macuacua, E. J. (2023). *Estudo da variação espacial e sazonal da acidificação oceânica na região ocidental do Oceano Índico*. Monografia de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique.
57. Malan, D., et al. (2004). "Hydrography and Nutrients in the Mozambique Channel: Implications for Marine Productivity." *Deep Sea Research Part II*.
58. Manuari, B. A. (2024). *Estudo da distribuição de nutrientes (Ferro, Nitrato e Fosfato) e sua relação com a produtividade primária na região norte e centro do Canal de Moçambique*. Monografia de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique.
59. Manzolli, R. P., Portz, L., & Paiva, M. (2011). *Oceanografia Química*. In: CALAZANS, D. (Orgs.). *Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático*. Pelotas: Textos, 6, 130- 155.
60. Marengo, J., (2006). *On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: A historical review and current State-of-the-art*, no prelo, *Revista Brasileira de Meteorologia*.
61. McClanahan, T. R., Muthiga, N., Mangi, S., & Mavili, V. (2008). *Environmental drivers of productivity and fishery yields in the Mozambique Channel*. *Fisheries Oceanography*, 17 (3), 222-234.

62. McGowan, P. E., Reglinski, J., Wilson, R., Walker, J. J., Wisdom, S., & McKillop, J. H. (1993). Análise quantitativa de ¹H-RMN do líquido amniótico. *Revista de análise farmacêutica e biomédica*, 11 (8), 629-632.
63. McMurtry, P. A., Riley, J. J., & Metcalfe, R. W. (1989). Efeitos da liberação de calor na estrutura em larga escala em camadas de mistura turbulentas. *Revista de Mecânica dos Fluidos*, 199, 297-332.
64. Mendes et al. (2018). Impacto do fluxo fluvial na fertilidade do banco de Sofala", *Revista Brasileira de Oceanografia*.
65. Millero, F. J. (1996). *Chemical Oceanography*. 2th Ed. CRC Press. pp. 281, 290, 308-320.
66. Moore, J. K., Doney, S. C., & Lindsay, K. (2008). Upper ocean ecosystem dynamics and iron cycling in a global three-dimensional model. *Global Biogeochemical Cycles*, 18 (1), GB4028.
67. Muller, M., et al. (2014). Circulation patterns and their influence on carbon fluxes in the Mozambique Channel. *Deep Sea Research Part I*.
68. Nelson, D. M., Brzezinski, M. A., Sigmon, D. E., & Franck, V. M. (1995). A seasonal progression of Si limitation in the Pacific sector of the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 42 (4-5), 1069-1093.
69. Niencheski, L. F. H. (2015). Propriedades químicas da água de mar. In: Castello, J. P., Krug, L. C. (Org.). *Introdução às Ciências do Mar*. Pelotas: Editora Textos, 6, 140-171.
70. Obura, D., Miloslavich, P., Bax, N. J., Simmons, S. E., Klein, E., Appeltans, W., Aburto-Oropeza, O., Garcia, M. A., Batten, S. D., Jr, D. M. C., Chiba, S., Duffy, J. E., Dunn, D. C., Fischer, A., Gunn, J., Kudela, R., Marsac, F., & Shin, Y-J. (2018). Variáveis oceânicas essenciais para observações globais sustentadas da biodiversidade e das mudanças nos sistemas. *Biologia da mudança global*, 24 (6), 2416-2433.
71. ODUM, E. P. (2004). *Fundamentos de Ecologia*. 6. ed. São Paulo: Fundação Calouste Gulbenkian, cap. 3, p. 55-129.
72. Oppenheim, A. V., & Willsky, A. S. (1997). *Signals and Systems*. Prentice Hall.
73. Orr, J. C., et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437 (7059), 681-686.
74. Orr, J.C., Caldeira, K., Fabry, V., Gattuso, J.-P., Haugan, P., Lehodey, P., Pantoja, S., Pörtner, H.-O., Riebesell, U., Trull, T., Hood, M., Urban, E., Broadgate, W. (2009). Research priorities for ocean acidification, report from the Second Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World, Monaco, October 6-9, 2008, convened by SCOR, UNESCO-IOC, IAEA, and IGBP, 25.
75. Ratkowsky, D. A., Lowry, R. K., Mcmeekin, T. A., Stokes, A. N., & Chandler, R. E. (1983). Modelo para taxa de crescimento de cultura bacteriana em toda a faixa de temperatura biocinética. *Revista de bacteriologia*, 154 (3), 1222-1226.

76. Raven, J. A., & Beardall, J. (2003). Carbon acquisition mechanisms of algae: carbon dioxide diffusion and carbon dioxide concentrating mechanisms. *Photosynthesis in algae*, 225-244
77. Rew, R., Davis, G., & Hovland, P. (2015). *HDF5: Hierarchical Data Format version 5*. Society of Exploration Geophysicists.
78. Riebesell, U., Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M. M., Dickinson, R. E. E., Hauglustaine, D., Jacob, D., Dias, P. L. S., Arora, V., Fung, I., Fuzzi, S., Gong, S., Menon, S., Miller, J. B., ..., Noije, T. V., Zhou, L. (2007). Acoplamentos entre mudanças no sistema climático e biogeoquímico. *Mudanças climáticas. Base de Ciência Física*.
79. Roberts, N. M., Kendon, E., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., & Sênior, C. A. (2014). Modelo de resolução de previsão do tempo revela chuvas mais fortes no verão com mudanças climáticas. *Natureza Mudanças Climáticas* 4 (7), 570-576.
80. Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., et al. (2004). The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂. *Science*, 305 (5682), 367-371.
81. Sætre, R., & Da Silva, A. J. (1984) The circulation of the Mozambique Channel. *Deep-Sea Res.*, 31, 485-508.
82. Schmittner, A., et al. (2005). Climate change, the carbon cycle, and the ocean. *Science*, 310 (5752), 1952–1954.
83. Sigman, D. M., & Hain, M. P. (2012). A produtividade biológica do oceano. *Educação da Natureza Conhecimento*, 3 (10), 21.
84. Silva, K. Z., & Colombo, R. (2019). *Mudanças climáticas: Influências Antrópicas, Impactos e Perspectivas*.
85. Simpson, J. H., & Sharples, K. A. (2012). *Oceanographic processes: An introduction*. John Wiley & Sons.
86. Smayda, T. J. (1990). Nutrient limitation in the sea: Starvation, growth and plankton blooms. *Limnology and Oceanography*, 35 (7), 1085-1094.
87. Smith, S. V. (1995). *Intertidal wetlands: A functional perspective*. Springer Springer, 391-403.
88. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B. B., Berntsen, T. Blindoff, N. L. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M. M., Hegerl, B. J., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins; B.J.J., ..., Whetton, P. A. W. R., Wood, R. A. A., & Wratt, D. (2007). *Resumo teórico: Mudanças climáticas. A Base da Ciência Física*.
89. Stocker, T. F., Mastrandrea, M. D., Field, C. B., Edenhofer, O., Ebi, K. L., Frame, D. J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K. J., Matschoss, P. R., Plattner, G-K., Yohe, G. W., & Zwiers, F. W. (2010). *Nota de orientação para os principais autores do quinto relatório de avaliação do IPCC sobre o tratamento consistente das incertezas. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*.

90. Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., et al. (2009). Global air-sea fluxes of CO₂: Results from the Global Data Set. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (4).
91. Telesh, I. A., & Khlebovich, V. V. (2010). Salinity effects on marine ecosystems. Springer.
92. Tréguer, P., Nelson, D. M., Van Bennekom, A. J., Demaster, D. J., Leynaert, A., & Quéguiner, B. (1995). The silica balance in the world ocean: A reestimate. *Science*, 268 (5209), 375-379.
93. Valery, J. (2014). *Satélites e Tecnologia Espacial*. Editora Ciência e Tecnologia.
94. Wanninkhof, R. (1992). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97 (C5), 7373–7382.