



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestrado em Aquacultura Sustentável

**Efeito do Ambiente e o Método de Cultivo Sobre o Crescimento da Macroalga *Eucheuma denticulatum* na Região Norte de Moçambique**

Autora: Ana Domingos Madeira

Maputo, Julho de 2024



Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestrado em Aquacultura Sustentável

**Efeito do Ambiente e o Método de Cultivo Sobre o Crescimento da Macroalga *Eucheuma denticulatum* na Região Norte de Moçambique**

**Presidente do Júri**

---

Prof. Doutor Hélder Arlindo Machiaie  
UEM-Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

**Supervisor**

---

Doutor Anildo Naftal Nataniel  
UEM-Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

**Avaliadora**

---

Doutora Fadia Tala  
Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

Maputo, Julho de 2024

## **Agradecimentos**

Agradeço a DEUS em primeiro lugar, pois em momento algum desta jornada me deixou desamparada.

Endereço um especial agradecimento ao professor Sidónio, não só pelos dados que forneceu para a redação desta dissertação, mas também pelo apoio incondicional com o qual sei que sempre posso contar. Igualmente agradeço ao meu estimado colega e amigo Mateus por ter fornecido dados e informações adicionais sempre que precisei. Agradeço imensamente ao meu mentor, a quem considero um pai, pelo seu apoio e instrução não só na redação deste estudo mas também nas questões do dia a dia que tem me tornado uma pessoa e profissional melhor.

Aos meus pais, Rosaria Julião e Domingos Madeira pelo apoio incondicional e confiança que depositaram em mim durante estes anos de estudo. Meus irmãos que sempre estiveram em meu coração e pelo carinho, agradeço imenso.

As minhas tias, Paula em especial por me receber em sua casa, tia Paulinha, tia Ana, tia Helena e tia Dulce pelo amor e preocupação que sempre demonstraram. Avo Lúcia, e avo Eugénia por cuidarem de mim sempre. Tio Acácio, minha Gizela, mãe Júlia, todos irmãos em Cristo e minhas queridas primas pelo apoio.

A todos colegas do ano 2021 e os meus amigos Maria Bauque, Anselmo Chauque, Sónia Langa, Gesica Canivete, Nuno Mussa, Amós Nhaca, Nélio Siteo, Ricardo Mapulende e Luísa Jaqueline, agradeço imenso.

Romanos 8:37 “ *Mas em todas estas coisas somos mais que vencedores, por aquele que nos amou*”

### **Declaração de Honra**

Declaro que esta dissertação nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Esta dissertação é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de Mestrado em Aquacultura Sustentável, da Universidade Eduardo Mondlane.

---

(Ana Domingos Madeira)

## Resumo

O cultivo de macroalgas desempenha um papel importante em várias regiões tropicais e equatoriais, contribuindo para o desenvolvimento econômico local e global. Em Moçambique o potencial para o cultivo de macroalgas *E. denticulatum* e outras espécies é estimado em cerca de 10.600 hectares, porém o registo de produção em larga escala é reduzido. Neste contexto, o presente estudo visou avaliar a influência do ambiente sobre o cultivo da alga *E. denticulatum* na região norte de Moçambique. O cultivo foi conduzido nas regiões de Palma e Mossuril, durante 9 meses, utilizando duas técnicas de cultivo denominadas por fixação de fundo e rede tubular. As amostragens eram feitas quinzenalmente para o registo da biomassa, observação da qualidade das partes vegetativas e monitorais dos parâmetros físico-químicos no local. Os outros parâmetros de dados ambientais usados correlacionar com a biomassa assim como a taxa de crescimento relativa (TCR) foram obtidos no My Ocean Copernicus. Foi aplicado o modelo adetivo generalizado (GAM) determinar a influência do ambiente sobre o acúmulo de biomassa e a TCR ao longo do cultivo. A comparação entre os métodos de cultivo foi feita usando o t-test de amostras independente. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R. Os resultados indicaram que não houve diferenças significativas no acúmulo de biomassa entre as duas técnicas de cultivo ( $t = -1.40$ ,  $df = 392$ ,  $p\text{-value} = 0.16$ ), embora a técnica de rede tubular tenha apresentado maiores valores de biomassa ( $12.16 \pm 11.34$  kg). Em relação a TCR, o método de rede tubular teve maior valor da taxa de crescimento relativa ( $16.44 \pm 18.48$  kg) comparativamente ao método de fixação de fundo ( $5.45 \pm 7.48$  kg), e estas diferenças foram comprovadas pelo teste ( $t = -7.01$ ,  $df = 179.45$ ,  $p\text{-value} < 0.05$ ). O modelo de biomassa explicou ~97% da variação total, enquanto o modelo de taxa de crescimento explicou ~90%, ambos com níveis significativos das variáveis selecionadas altas ( $p\text{-value} < 0.001$ ). As variáveis que mais influenciaram a variação da biomassa foram altura da maré (F-estatístico ~175), pH (F-estatístico ~125), temperatura da superfície do mar (SST, F-estatístico ~44), carbono inorgânico dissolvido (DIC, F-estatístico ~37) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ , F-estatístico ~32). Para a variação da taxa de crescimento, as variáveis mais influentes foram nitrato ( $\text{NO}_3^-$ , F-estatístico ~89), temperatura da superfície do mar (SST, F-estatístico ~39) e energia das ondas (SWH, F-estatístico ~12). Esses resultados destacam a importância de monitorar as variáveis ambientais durante o cultivo de *E. denticulatum* para otimizar a produção e podem contribuir para orientação na seleção dos locais para o estabelecimento de empreendimentos de aquacultura de macroalgas para recuperação dos ecossistemas assim como para fins socioeconômicos.

**Palavras Chaves:** Cultivo de macroalgas, Biomassa, Taxa de crescimento relativa (TCR), Variáveis ambientais e *E. denticulatum*.

## Abstract

Macroalgae cultivation plays an important role in several tropical and equatorial regions, contributing to local and global economic development. In Mozambique, the potential for the cultivation of macroalgae *E. denticulatum* and other species is estimated at around 10,600 hectares, but the record of large-scale production is low. In this context, this study aimed to evaluate the influence of the environment on the cultivation of the alga *E. denticulatum* in the northern region of Mozambique. Cultivation was carried out in the Palma and Mossuril regions for 9 months, using two cultivation techniques called "tie-tie" and tubular net. Samples were taken every two weeks to record the biomass, observe the quality of the vegetative parts and monitor the physico-chemical parameters at the site. The other environmental data parameters used to correlate with biomass as well as the relative growth rate (RGR) were obtained from My Ocean Copernicus. The generalized additive model (GAM) was applied to determine the influence of the environment on biomass accumulation and TCR throughout cultivation. The comparison between cultivation methods was made using the independent samples t-test. All statistical analyses were carried out using R software. The results indicated that there were no significant differences in biomass accumulation between the two cultivation techniques ( $t = -1.40$ ,  $df = 392$ ,  $p\text{-value} = 0.16$ ), although the tubular net technique showed higher biomass values ( $12.16 \pm 11.34$  kg). Regarding to TCR, the tubular net method had a higher relative growth rate ( $16.44 \pm 18.48$  kg) compared to the tie-tie method ( $5.45 \pm 7.48$  kg), and these differences were confirmed by the test ( $t = -7.01$ ,  $df = 179.45$ ,  $p\text{-value} < 0.05$ ). The biomass model explained ~97% of the total variation, while the growth rate model explained ~90%, both with significant levels of the high selected variables ( $p\text{-value} < 0.001$ ). The variables that most influenced the variation in biomass were tidal height (F-statistic ~175), pH (F-statistic ~125), sea surface temperature (SST, F-statistic ~44), dissolved inorganic carbon (DIC, F-statistic ~37) and nitrate ( $\text{NO}_3^-$ , F-statistic ~32). For growth rate variation, the most influential variables were nitrate ( $\text{NO}_3^-$ , F-statistic ~89), sea surface temperature (SST, F-statistic ~39) and wave energy (SWH, F-statistic ~12). These results highlight the importance of monitoring environmental variables during the cultivation of *E. denticulatum* in order to optimize production and can help guide the selection of sites for the establishment of macroalgae aquaculture enterprises for ecosystem recovery as well as for socio-economic purposes.

**Key words:** Seaweed cultivation, Biomass, Relative growth rate (RCR), Environmental variables and *E. denticulatum*

## Lista de Figuras

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Figura 1 | Eucheuma denticulatum  | 6  |
| Figura 2 | Métodos de Cultivo de Macroalgas   | 8  |
| Figura 3 | Localização da área do estudo  | 11 |
| Figura 4 | Biometria Quinzenal  | 12 |
| Figura 5 | Acumulação da biomassa da macroalga <i>E. denticulatum</i> durante 6 semanas de cultivo  | 16 |
| Figura 6 | Influência das variáveis ambientais no crescimento da macroalga <i>E. denticulatum</i> em Nacuxa, distrito de Mossuril                       | 19 |
| Figura 7 | Influência das variáveis ambientais na taxa de crescimento relativa (TCR) da macroalga <i>E. denticulatum</i> em Nacuxa distrito de Mossuril | 20 |
| Figura 8 | Média de ganho de peso (A), taxa de crescimento (B)  | 21 |

## Lista de Tabelas

| Nr       | Título   | Página |
|----------|--|--------|
| Tabela 1 | Variáveis físico-químicas usadas para relacionar o efeito no crescimento de macroalga das espécies <i>E. denticulatum</i>                                  | 13     |
| Tabela 2 | Resultados estatísticos do GAM selecionado para acumulação da biomassa e a Taxa de crescimento da macroalga <i>E. denticulatum</i> no distrito de Mossuril | 17     |

## Lista de Abreviaturas

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>AIC</b>            | Critério de Informação Akaike                                      |
| <b>Dic</b>            | Carbono Inorgânico dissolvido                                      |
| <b>FOB</b>            | Sistema de Fixação de Fundo  |
| <b>GAM</b>            | Modelo Aditivo Generalizado  |
| <b>MareMin</b>        | Altura Mínima da Maré  |
| <b>MGCV</b>           | Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation |
| <b>NO<sub>3</sub></b> | Nitrato  |
| <b>O<sub>2</sub></b>  | Oxigénio Dissolvido  |
| <b>ODS</b>            | Objectivos de Desenvolvimento Sustentavel                          |
| <b>pH</b>             | Potencial Hidrogenionico   |
| <b>PO<sub>4</sub></b> | Fosfato  |
| <b>RT</b>             | Rede Tubular   |
| <b>SSS</b>            | Sea Surface Salinity   |
| <b>SST</b>            | Sea Surface Temperature  |
| <b>SWV</b>            | Sea Wave Velocity  |
| <b>TCR</b>            | Taxa de Crescimento Relativo                                       |
| <b>RMSE</b>           | Erro dos Mínimos Quadrados   |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Dióxido de Carbono   |
| <b>NR</b>             | Nitrato Redutase   |
| <b>R-sq.(adj)</b>     | R quadrado ajustado  |
| <b>Dev. Expl. (%)</b> | Desvio Explicado   |
| <b>GCV</b>            | Generalized Cross Validation                                       |
| <b>Rho</b>            | Spearman's correlation coefficient                                 |
| <b>DGR</b>            | Daily Growth Rate  |
| <b>SSH</b>            | Sea Surface Height   |
| <b>W<sub>0</sub></b>  | Biomassa Inicial   |
| <b>W<sub>t</sub></b>  | Biomassa em t dias de cultura                                      |
| <b>t</b>              | Tempo de cultivo   |

## Índice

|   |     |
|---|-----|
| Agradecimentos.....   | i   |
| Declaração de Honra.....  | ii  |
| Resumo .....  | iii |
| Abstract.....   | iv  |
| Lista de Figuras.....   | v   |
| Lista de Tabelas .....  | v   |
| Lista de Abreviaturas.....  | vi  |
| Introdução.....   | 1   |
| 1.1 Problematização e Justificativa .....   | 2   |
| 1.2. Objectivos.....  | 4   |
| 2.1. Visão Geral .....  | 5   |
| 2.2. Taxonómia .....  | 5   |
| 2.3. Características Morfológicas .....   | 6   |
| 2.4 Distribuição Geográfica e Cultivo de Macroalgas.....                                | 7   |
| 2.5 Sistemas de cultivo .....   | 8   |
| 2.6 Desafios no cultivo de algas marinhas.....  | 9   |
| 2.7 Aplicação do Modelo Aditivo Generalizado nos Estudos de Macroalgas .....            | 10  |
| 3. Metodologia.....   | 11  |
| 3.1 Área de estudo .....  | 11  |
| 3.2. Fonte de dados Macroalgas .....  | 12  |
| 3.3 Dados de Variáveis Ambientais.....  | 13  |
| 3.4 Análise dados.....  | 14  |
| 4. Resultados.....  | 17  |
| 4.1 Performance do Modelo .....   | 17  |
| 4.2 Efeito das variáveis ambientais sobre o crescimento de <i>E. denticulatum</i> ..... | 19  |
| 4.3 Comparação dos Métodos de Cultivo.....  | 21  |

|   |    |
|---|----|
| 5. Discussão .....                                      | 22 |
| 6. Conclusões.....                                      | 29 |
| 7. Recomendações e Futuras Linhas de Investigação ..... | 30 |
| 8. Referências Bibliográficas.....                      | 31 |
| 10. Anexos – Material Suplementar (S) .....             | 37 |

## Introdução

As macroalgas representam uma das maiores produções dentro da aquacultura marinha mundial, tendo atingido em 2018 cerca de 32,4 milhões de toneladas, e rendendo cerca de US\$13,3 bilhões ((Msuya et al., 2022)). Nos últimos anos o cultivo, mercado de macroalgas e seus derivados continua atraindo muita atenção e espera-se um crescimento anual de 9.1% até 2027, associado as suas várias aplicações na indústria alimentar, química, farmacêutica, cosmética e energética (Arias-Echeverri et al., 2022). As espécies de algas vermelhas (*Kappaphycus* spp. e *Eucheuma* spp.) particularmente abundantes em águas tropicais e quentes tem sido as mais utilizados na aquacultura (Msuya & Hurtado, 2017).

Na costa Africana há uma enorme diversidade de macroalgas, cerca de 2200 espécies correspondente a mais de 20 % do total global, das quais 1400 são rodofitas, 400 clorofitas e 400 feofitas. As características de vários países africanos conferem ao continente enorme potencial para o cultivo de macroalgas, desde a enorme diversidade específica, características do clima e disponibilidade de terra para o efeito. As espécies de algas vermelhas *Eucheuma* spp. e *Kappaphycus* spp. são as mais produzidas em Africa com cerca de 110,000–130,000 t de produção anual ((Msuya et al., 2022)).

Moçambique, que é uma das maiores linhas de costa de Africa com cerca de 2700 km (Hogwane, 2007) cujas águas são caracterizadas por um clima favorável para uma enorme diversidade de macroalgas, já foram identificadas cerca de 360 espécies em 3 regiões do País (Ilha de Inhaca, Arquipélago das Quirimbas e província de Nampula), das quais 168 são algas vermelhas, 126 verdes e 66 marrons (Carvalho e Bandeira 2003). O potencial para o cultivo de macroalgas estimado em 2011 foi cerca de 10,591 hectares de áreas identificadas com maior potencial para o cultivo de *E. denticulatum* e *Kappaphycus* spp. ((Msuya et al., 2022)).

A espécie *Eucheuma denticulatum* é a principal matéria-prima para a extração de carragenina, substância que possui propriedades espessantes e estabilizantes, muito utilizada pelas indústrias alimentícia, química, têxtil, entre outras (Arias-Echeverri et al., 2022). A espécie *E. denticulatum*, assim como outras espécies podem apresentar variações de cores, taxa de crescimento e na composição química de acordo com as características físico-químicas do local onde estão sendo cultivadas, tais como variação da intensidade de luz, temperatura, salinidade, nutrientes, intensidade de corrente e sua pH, energia da onda, entre outras variações do ambiente (Ucedo, 2019). As variações podem ainda ser influenciadas pelas técnicas de cultivo, cuja comparação foi abordada no presente estudo.

A influência das variáveis ambientais no crescimento, distribuição espacial e sazonal das macroalgas já foi evidenciada em outros estudos com aplicação do modelo aditivo generalizado (Simon Wood, 2006). Por exemplo, GAM já foi aplicado para fazer a previsão espacial do ambiente adequado para a

maricultura de diferentes espécies de macroalgas na zona costeira e nas águas marítimas de Bangladesh (Sarker et al., 2021; Tasnim et al., 2024), modelar agregação e distribuição da biomassa da algas marrons na região oeste da costa Norueguesa (van Son et al., 2020) e para avaliar a influência das variáveis ambientais sobre a taxa de crescimento da macroalga marron *Laminaria digitata* na região norte da Irlanda (Kregting et al., 2016). Assim, o presente estudo aplicou o GAM para avaliar o efeito das variáveis ambientais na acumulação da biomassa e variação da taxa de crescimento da espécie de macroalga *Eucheuma denticulatum* na região norte de Moçambique.

Portanto, a presente dissertação está estruturada da seguinte forma: Capítulo I que apresenta a introdução, problematização, justificativa e os objectivos de estudo. No capítulo II foi feita a revisão bibliográfica sobre a ecologia das espécies em estudo e descrição da aplicação do modelo aditivo generalizado e no capítulo III foi descrita a metodologia usada na pesquisa. No Capítulo IV foram apresentados os principais resultados, no capítulo V foi feita a discussão dos resultados e no capítulo VI foram apresentadas as conclusões do presente estudo. No final, foram apresentadas as referências no capítulo VII e o anexo no capítulo VIII.

## 1.1 Problematização e Justificativa

Com a produção global de algas marinhas em expansão exponencial nas últimas décadas e o crescimento internacional da demanda por este produto, especialmente de países sem consumo tradicional ou uso de algas marinhas, África dispõe de recursos costeiros significativos para aumentar a sua produção de algas marinhas e capitalizar essa demanda crescente. Mudanças climáticas e preços baixos são apenas alguns dos desafios enfrentados pela indústria, mas os produtores de algas marinhas mostraram como a indústria pode se desenvolver em um período relativamente curto de tempo, para se tornar um dos principais produtores fora da Ásia ((Msuya et al., 2022)).

A produção comercial de macroalgas em Moçambique começou no início dos anos 2000 em Pemba e Nampula. As espécies *Eucheuma* spp. e *Kappaphycus* spp foram experimentais no cultivo cujas mudas foram importadas de Zanzibar, Tanzânia. Em 2003, foi relatada a produção de 5,230.00 t de *Kappaphycus* e *Eucheuma* avaliada em US\$105mil, envolvendo a renda socioeconómica de 2,000.00 Maricultores. No entanto, a produção diminuiu significativamente para 230 t em 2009, devido a inconsistência da produção e desafios logísticos, sendo que apenas 143 Maricultores permaneceram na indústria (Msuya et al., 2022). Contudo, a variação do crescimento destas macroalgas pode ser atribuída a variação genética entre mudas; diferentes condições ambientais, com destaque para a temperatura e

níveis de nutrientes (Kotia et al., 2011), a intensidade das ondas e correntes de mares (Kregting et al., 2016) e métodos de cultivo, incluindo densidade, profundidade e duração do cultivo até a colheita (Hurtado, 2010), por isso, o presente estudo permitirá a compreensão dos fatores associados a estagnação do cultivo de macroalgas na região em estudo, a partir da determinação do nível de influência dos parâmetros ambientais sobre o crescimento das macroalgas carragenófitas na região norte do país.

São inúmeras as vantagens socioeconômicas do cultivo de macroalgas baseada na geração de trabalho e renda econômica proveniente do cultivo para as comunidades litorâneas. A adoção do cultivo de algas marinhas entre as comunidades costeiras de outras regiões, como a Indonésia, é atribuída à facilidade das técnicas de cultivo, colheita e secagem, ao baixo nível de investimento de capital inicial necessário e ao curto ciclo de produção que proporciona uma fonte regular de rendimento para famílias agrícolas. Os rendimentos obtidos com o cultivo de algas marinhas contribuem para o bem-estar das famílias nas comunidades, especialmente no que se refere ao transporte, habitação, saúde, educação e entre outras necessidades básicas.

Portanto, a compreensão da influência dos parâmetros ambientais sobre o crescimento da macroalga carragenófitas *Eucheuma* ajudará a determinar as condições ótimas do seu cultivo, impulsionando o crescimento da atividade para o desenvolvimento socioeconômico das comunidades na região.

## 1.2. Objectivos

### 1.2.1 Objectivo geral

- Avaliar o efeito das variáveis ambientais e das técnicas de cultivo na produção da biomassa e taxa de crescimento relativa de *E. denticulatum* cultivada na região norte de Moçambique.

### 1.2.2 Objectivos específicos

- Determinar a influencia das variáveis ambientais sobre a taxa de crescimento da espécie.
- Relacionar o efeito dos parâmetros ambientais com a produção da biomassa da espécie;
- Comparar dois métodos de cultivo em relação à produção de biomassa e à taxa de crescimento;

## 2. Revisão de Literatura

### 2.1. Visão Geral

A expansão do cultivo de algas marinhas é reconhecida como uma das melhores abordagens para concretizar muitos dos objectivos de desenvolvimento sustentável (ODS) das Nações Unidas, nomeadamente: erradicação da pobreza, fome zero, boa saúde e bem-estar, trabalho digno e crescimento económico, reduzir as desigualdades, consumo e produção responsáveis, ação climática e vida abaixo da água (Tullberg et al., 2022).

*Eucheuma* é um gênero de algas vermelhas que constitui uma das principais fontes mundiais de carragenina e apoia importantes indústrias de pequena escala em muitas áreas costeiras do Sudeste Asiático, do Pacífico ocidental e do Oceano Índico ocidental.

*Eucheuma denticulatum* (spinosum) é a principal fonte de carragenina iota, é cultivada em menores quantidades e em menos países do que *Kappaphycus alvarezii* ('cottonii') que produz carragenina kappa, mas é, no entanto, importante (mais de 175.000 toneladas por ano). A Indonésia, as Filipinas e a Tanzânia são os principais produtores de *E. denticulatum* (Azanza & Ask, 2017).

### 2.2. Taxonómia

No passado, "*Eucheuma*" era o nome usado para se referir a todas as carragenófitas. A espécie *Eucheuma denticulatum*, produtora de iota carragenina, era chamada de 'spinosum' no comércio. O organismo denominado '*Eucheuma cottonii*', produtor de kappa carragenina, foi denominado pelo nome comercial 'cottonii'. Todas as algas produtoras de kappa-carragenina são agora colocadas no gênero *Kappaphycus*, as produtoras de iota-carragenina sob *Eucheuma* e as produtoras de beta-carragenina sob *Betaphycus*. Além de suas diferenças bioquímicas, esses diferentes gêneros euquematóides também apresentam características morfoanatômicas distintas (Azanza & spp, 2023).

De acordo com a nomenclatura botânica internacional, a espécie em estudo pode ser inserida na seguinte classificação taxonómica:

|         |                  |
|---------|------------------|
| Domínio | <u>Eukaryota</u> |
| Reino   | Plantae          |
| Filo    | Rodophyta        |
| Ordem   | Gigartinales     |
| Família | Solieriaceae     |
| Classe  | Rhodophyceae     |

|         |                              |
|---------|------------------------------|
| Gênero  | Eucheuma                     |
| Espécie | <i>Eucheuma denticulatum</i> |

### 2.3. Características Morfológicas

A espécie apresenta coloração verde, marron ou vermelha com variantes dessas cores dependendo das condições de luz durante o cultivo (Figura 1). *Eucheuma denticulatum* pode formar estruturas semelhantes a tapetes por meio de rizoides que fixam/estendem o organismo ao substrato disponível (por exemplo, entulho de coral ou pequenas pedras).

O talo de *Eucheuma denticulatum* varia de 35 a 74 cm de comprimento, são frágeis a cartilaginosas. Os ramos principais variam de 7 a 9 cm de comprimento com raminhos espiralados/espinhosos.

As estruturas reprodutivas são formadas nas partes maduras do talo. Os representantes das diferentes fases da vida são isomórficos e semelhantes (Azanza & Ask, 2017).



**Figura 1:** *Eucheuma denticulatum* (Msuya et al., 2014).

### Reprodução

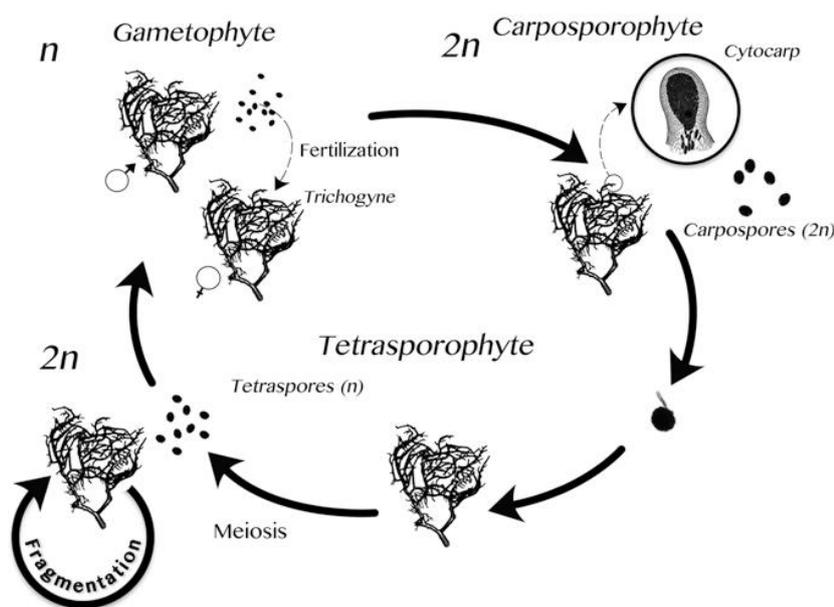
O ciclo de vida do *Eucheuma* é trifásico e inclui as fases de carposporófito ( $2n$ ) e gametófito ( $n$ ). Foram documentadas estruturas vegetativas e reprodutivas em populações tetraspóricas e gametofíticas, bem como a sua ocorrência em locais agrícolas nas Filipinas (Azanza & Ask, 2017).

O *Eucheuma denticulatum* produz tetrásporos zonados, tendo-se constatado que os exemplares cultivados apresentam uma maior proporção de tetrasporófitos do que os encontrados na natureza. No entanto, os gametófitos e as estruturas masculinas são raros ou até desconhecidos neste gênero. De

acordo com um estudo realizado por Azanza-Corrales et al. (1992), a regeneração vegetativa das plantas mantém as mesmas fases reprodutivas, o que implica que a proporção de fases reprodutivas (masculina, feminina e tetraspórica) poderá reflectir as das plantas originais introduzidas na área.

A esporogénese e a gametogénese podem ocorrer sem libertação ou germinação. Apesar de os esporos poderem ser libertados, a ausência de substratos adequados no local reduz significativamente a probabilidade de assentamento e germinação.

O cultivo de clones tem-se mostrado bastante útil na agricultura actual. Contudo, investigações futuras deverão incluir o uso de esporos para cultura, tal como se realiza em outras algas marinhas de importância económica, como a *Porphyra* e a *Laminaria*. O cultivo a partir de esporos poderá viabilizar novas manipulações agrícolas e contribuir para o aumento da variabilidade genética (Azanza & Ask, 2017).



**Figura.2:** Ciclo de vida de Kappaphycus e Eucheuma

**Fonte:** Azanza et al., 2023.

## 2.4 Distribuição Geográfica e Cultivo de Macroalgas

As espécies do género *Eucheuma* são nativas das regiões mais quentes dos oceanos Índico e Pacífico Ocidental, no entanto, elas foram introduzidas nas partes orientais do Pacífico e oeste do Oceano Atlântico. Devido as alterações na taxonomia dos euqueumatóides ao longo dos anos, é possível que alguns dos registos mais antigos da distribuição se refiram a espécies que são agora consideradas parte de *Kappaphycus* como *Eucheuma* (Azanza & Ask, 2017).

Tal como acontece com qualquer forma de aquacultura, a infra-estrutura e os métodos de cultivo utilizados são altamente dependentes das espécies de algas e do seu ambiente ideal de crescimento. Os sistemas mais simples podem muitas vezes fornecer inspiração para um maior desenvolvimento da actividade.

Dada luz solar adequada para a fotossíntese, disponibilidade de nutrientes, salinidade, faixa de temperatura, oxigénio e dióxido de carbono, os propágulos de algas marinhas podem crescer independentemente da profundidade do mar abaixo. Dependendo da fragilidade da espécie, a velocidade da água, através da acção das ondas, correntes, ou marés, precisam estar dentro dos limites para evitar danos e limitação para absorção ideais de nutrientes e crescimento (Tullberg et al., 2022).

As etapas do cultivo de algas marinhas incluem a selecção do local, selecção e preparação de espécies, selecção do método de cultivo e manutenção em campo até a colheita.

A selecção do local é o parâmetro mais significativo no cultivo de macroalgas. A espécie é seleccionada com base na aplicação final (alimentos, rações, hidrocolóide, biocombustível e compostos bioativos) e adequação do ambiente (Jagtap & Meena, 2021).

## **2.5 Sistemas de cultivo**

Os sistemas de cultivo de macroalgas podem ser classificados de acordo com 4 critérios a saber: quanto ao local de implantação (mar aberto ou próximo a costa), quanto a profundidade (superficial ou de águas profundas), quanto a estrutura usada (fixas ou flutuantes) e quanto a técnica (cultivo em fixação de fundo ou rede tubular). Sua aplicação está intimamente relacionada com os objectivos do cultivo (Yahya et al., 2020<sup>a</sup>).

A grande vantagem do cultivo próximo à costa está relacionada com o baixo custo da actividade, podendo ser realizada por pescadores locais, mesmo com pouca habilidade. O método de estruturas fixas também é economicamente baixo em termos de investimento, trabalho e manutenção, mas raramente eficaz, em caso de colonização por infestação de algas marinhas e outras epífitas. Por outro lado, as técnicas flutuantes, exigem despesas relativamente elevadas, mas podem ser úteis para evitar surtos de epífitas.

Tanto o método de rede tubular quanto o método de fixação de fundo que é considerado método tradicional (Figura 2), são adotados por produtores comerciais para o cultivo de algas. O primeiro requer relativamente maior quantidade de biomassa inicial, para contornar isso, o método alternativo é a fixação de fundo. Nesta técnica a necessidade inicial de biomassa de mudas é menor, mas tem muita mão de obra e é comum o desprendimento das mudas (Kavale et al., 2021).



**Figura 2** – Métodos de Cultivo de Macroalgas. Painel superior – imagens do método de fixação de fundo (Msuya et al., 2014). Painel inferior- imagens do método de rede tubular (Noé, 2023)

## 2.6 Desafios no cultivo de algas marinhas

O cultivo de algas marinhas tem sido afectado negativamente pelas alterações climáticas, incluindo tempestades, tufões, aquecimento dos oceanos, terremotos, estações chuvosas prolongadas e fortes correntes de água que tem causado danos significativos. As epífitas e organismos concorrentes, como peixes herbívoros também podem maximizar os danos às fazendas.

A qualidade das macroalgas produzidas diminui devido a alterações do ambiente e um aumento de doenças nos campos de cultivo. Alterações ambientais como variações na temperatura da água, acidificação dos oceanos e poluição podem comprometer a fisiologia das macroalgas, afectando sua produtividade e composição bioquímica. Essas mudanças favorecem o desenvolvimento de patógenos, como bactérias e fungos, podendo causar doenças às algas, incluindo branqueamento e necrose dos tecidos (Gómez & Huovinen, 2020).

Assim, é necessário o desenvolvimento de sistemas de cultivo robustos e eficientes para o desempenho adequado das macroalgas a longo prazo, tendo em conta o uso de tecnologias acessíveis. Portanto, contínuos esforços devem ser feitos para aumentar a produtividade, melhorando métodos de cultivo e para aumentar a eficiência de conversão de biomassa em bio produtos (Jagtap & Meena, 2021).

## 2.7 Aplicação do Modelo Aditivo Generalizado nos Estudos de Macroalgas

O Modelo Aditivo Generalizado foi seleccionado para verificar o efeito das variáveis ambientais, e prever a redistribuição futura do camarão peneídeo na costa de Moçambique. Este modelo é capaz de lidar com relações não-lineares entre uma variável independente e múltiplos preditores, isto é, acoplar variáveis espaciais, temporais e ambientais (Barreto, 2016). O GAM já foi aplicado em estudos semelhantes a este, com o objectivo de avaliar a influência das variáveis ambientais sobre a taxa de crescimento da macroalga marron *Laminaria digitata* na região norte da Irlanda (Kregting et al., 2016).

- O modelo pode ser escrito da seguinte forma (Bonat & Dallazuanna, 2008).

$$g(\mu_i) = \theta + f_1 x_{1i} + f_2 x_{2i} + f_3 x_{3i} + \dots$$

ou

$$g(\mu_i) = \theta + \sum_{j=1}^p f_j(x_{ij})$$

Sendo:

- $\mu_i \equiv e^{y_i}$  alguma distribuição da família exponencial;
- $g_i$  é a variável resposta;
- $x_i$  é uma coluna da matriz do modelo para uma dada variável;
- $\theta$  é o vetor do parâmetro correspondente e;
- $f_i$  são as funções suaves das variáveis.
- $H(\theta)$  representa a função de ligação do modelo,  $X_1; \dots X_p$  definem-se como variáveis explicativas
- $f_j(\theta); j = 1; \dots p$ , são as funções parciais, também conhecidas como funções suavizadoras.

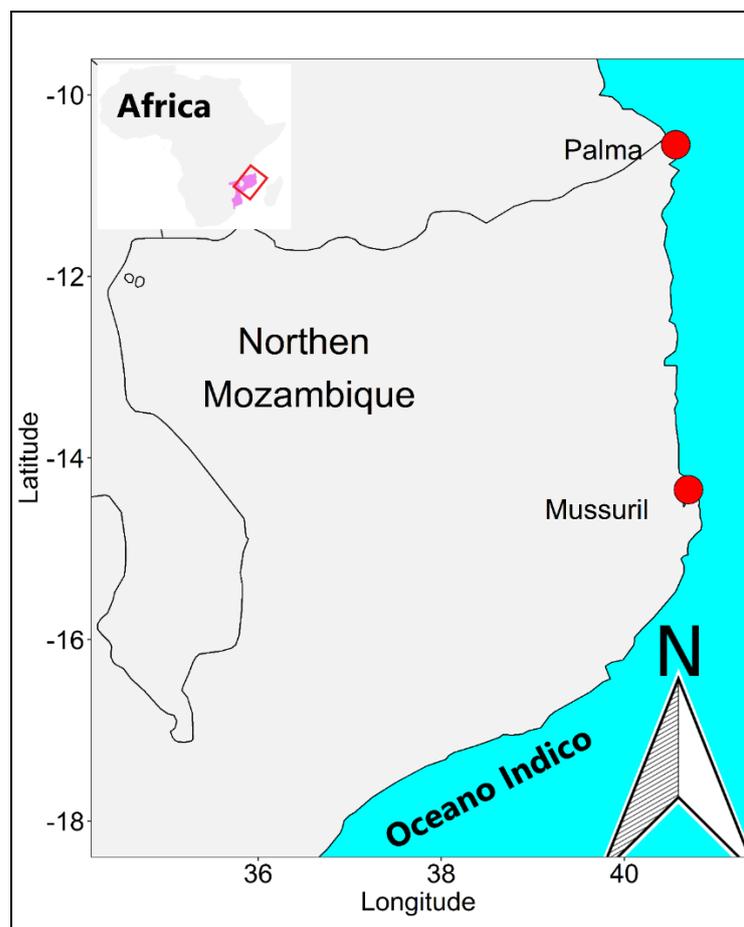
### **3. Metodologia**

#### **3.1 Área de estudo**

O estudo foi realizado no norte de Moçambique, nas províncias de Cabo Delgado (Palma), e Nampula em Mossuril (Figura 3), no período de Fevereiro a Setembro de 2023. A temperatura média anual do norte de Moçambique é de 25 °C, ocorrendo uma amplitude térmica anual relativamente baixa, de cerca de 3 °C, atingindo uma máxima de 27.9 °C nos meses mais quentes (IMPACTO, 2014). A salinidade é influenciada pelas massas de águas hipersalinas ~35‰ formadas no mar vermelho que fluem ao longo da região continental (Ullgren et al., 2012), as ondas são geradas no Canal de Moçambique e propagam-se em direção a costa contribuindo para a formação das dunas costeiras nas áreas de rebentamento (Miramontes et al., 2020) e as marés são semidiurnas e atinge uma amplitude de cerca de 4 metros (Sete, 2010).

A precipitação média mensal apresenta uma variação sazonal caracterizada por um período húmido, entre Novembro e Maio, cuja precipitação equivale cerca de 85% do valor total anual, sendo o mês de Abril o mês mais chuvoso em Palma, e Fevereiro em Mossuril com precipitação média mensal de cerca de 200 mm, e um período seco entre Junho a Outubro com médias mensais de precipitação inferiores a 50 mm (Projecto, 2012).

As praias de Palma e Mossuril são predominantemente arenosas cobertas de ervas marinhas e macroalgas e são potenciais áreas para a prática de cultivo de macroalga. A agricultura e a pesca constituem as ocupações básicas para o sustento e a segurança alimentar nestas áreas. Adicionalmente as actividades de agricultura e pesca, na região de Mossuril pratica-se também a mineração, pecuária e produção de sal como principais actividades (IMPACTO, 2014; Projecto, 2012).



**Figura 3:** Localização da área do estudo. A área violeta no mapa de Africa indica a localização de Moçambique e o retângulo vermelho a parte que cobre os pontos de estudo. Os pontos vermelhos indicam o locais onde foi feito o cultivo da espécie *E. denticulatum* na região norte de Moçambique no Oceano Indico.

### 3.2. Fonte de dados Macroalgas

Os dados foram fornecidos por SJChamo consultores Ltda, uma empresa vocacionada no ramo de aquacultura com maior enfoque no cultivo de macroalgas e, pelo Instituto Politécnico Mártires Cipriano de Nacuxa, que realiza o cultivo experimental de macroalgas em Nampula. Foram utilizados dois métodos de cultivo, isto é, o método de fixação de fundo na região de Palma e o método de redes tubulares (RT) em Mossuril. O método de fixação de fundo consistiu num sistema de fixação de estacas no fundo do mar na região entre marés, amarradas por uma corda de nylon com as algas, a uma distância de 25cm do fundo, posicionadas paralelamente a uma distância de 30cm umas às outras (Figura 2). As mudas foram previamente amarradas em terra firme nas cordas de nylon por meio de *tie-tie*. E, no método de RT, foram fixadas estacas no fundo do mar na região entre marés, onde foram amarradas redes tubulares com peso médio de algas variado em torno de 1.2Kg a uma distância de

25cm do fundo, posicionadas paralelas a uma distância de 30cm umas às outras. As mudas foram introduzidas nas redes no local de cultivo, com recurso a um tubo de PVC.

O estudo foi feito durante um período de oito meses em quatro ciclos de produção nos dois locais da região norte. A amostragem foi feita em intervalos de 15 dias durante a vazante das marés vivas em Mossuril durante 45 dias enquanto que em Palma a amostragem foi feita no dia do plantio e na colecta (60 dias de cultivo). Em Palma foram colhidas após 60 dias devido a aspectos logísticos. Após a colheita, as algas foram agitadas para retirar o excesso de água e pesadas em balança comercial para obtenção do peso fresco. A partir dos pesos frescos, as taxas de crescimento (DGR, %) das algas marinhas foram calculadas com recurso a fórmula a baixo (Munawan et al., 2021):

$$\text{DGR} = 100 \times [\ln (W_t/W_0)]/t$$

Onde:

**W<sub>0</sub>** é a biomassa inicial e

**W<sub>t</sub>** é a biomassa em t dias de cultura.

**T** é o tempo de cultivo

**DGR** é a taxa de crescimento diária.



*Figura 4: Biometria Quinzenal*

### 3.3 Dados de Variáveis Ambientais

Os dados de parâmetros ambientais usados neste estudo, foram obtidos na plataforma do consórcio MyOcean-Copernicus EU ([marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu)) no formato netCDF e foram convertidos para o formato CSV com o auxílio dos pacotes `ncdf4` (Pierce, 2023), `tidyverse` (Wickham et al., 2019), `lubridate` (Grolemund & Wickham, 2011) no programa R versão 4.3.1 (R Core Team, 2023). Os dados físicos extraídos foram: temperatura (SST - °C), salinidade (SSS – psu), altura da superfície do mar (SSH - m), altura mínima da maré (MareMin - m) e energia das ondas (SWV – ms<sup>-1</sup>) no produto CMEMS GLOBAL\_REANALYSIS\_001\_030. Também, foram extraídos dados biogeoquímicos tais como: oxigénio (mmol m<sup>-3</sup>) carbono inorgânico dissolvido (mmol m<sup>-3</sup>), fosfato (mmol m<sup>-3</sup>), nitrato (mmol m<sup>-3</sup>), e pH obtidos do produto GLOBAL\_REANALYSIS\_BIO\_001\_029. Os dados físico-químicos foram amostrados numa área espacial de 0.25<sup>0</sup> x 0.25<sup>0</sup> de resolução e a variável temporal considerada foram as semanas de cultivo em números ordinais (Tabela 1).

**Tabela.1:** Variáveis físico-químicas usadas para relacionar o efeito no crescimento de macroalga das espécies *E. denticulatum*.

| Variável                                       | Abreviação      | Unidade              | Resolução espacial | Resolução temporal |
|--|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Temperatura Superficial do Mar                 | SST             | °C                   | 0.25°              | 1dia               |
| Salinidade                                     | SSS             | psu                  | 0.25°              | 1dia               |
| Altura mínima da Maré                          | MareMin         | m                    | 0.25°              | 1dia               |
| Energia da Onda (altura significativa da onda) | swv             | m <sup>-1</sup>      | 0.25°              | 1dia               |
| Potencial de Hidrogénio                        | pH              |                      | 0.25°              | 1dia               |
| Oxigénio dissolvido                            | O <sub>2</sub>  | mmol m <sup>-3</sup> | 0.25°              | 1dia               |
| Carbono Inorgânico dissolvido                  | Dic             | mol m <sup>-3</sup>  | 0.25°              | 1dia               |
| Fosfato  | PO <sub>4</sub> | mmol m <sup>-3</sup> | 0.25°              | 1dia               |
| Nitrato  | NO <sub>3</sub> | mmol m <sup>-3</sup> | 0.25°              | 1dia               |
| Semanas  |                 |                      |                    |                    |

### 3.4 Análise dados

Na fase inicial de análise exploratória, verificou se que os dados do cultivo com o uso de método rede tubular tinham maior e melhor resolução temporal e uma amostragem consistente, por isso foram usados para ajuste do modelo em detrimento dos dados obtidos no cultivo com aplicação do método de *tie-tie*. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R versão 4.3.1 (Wu et al., 2023). Previamente, foram realizadas análises exploratórias dos dados antes de aplicação de qualquer técnica estatística, para a identificação dos potenciais problemas ou erros nos dados, e entender melhor os padrões presentes de distribuição dos dados, detetar desvios ou eventos anômalos na variável resposta, além de encontrar correlações interessantes entre as variáveis preditoras. Adicionalmente, foi feita uma inspeção gráfica sobre a natureza das variáveis, para avaliar a presença de valores anormais (uma observação que tem um valor relativamente grande ou pequeno em comparação com a maioria das observações). Uma ferramenta gráfica que normalmente é usada para deteção de valores discrepantes é o ‘boxplot’, que consiste em visualizar a mediana e a distribuição dos dados em percentis. Dependendo do software utilizado, a mediana é tipicamente apresentada como uma linha horizontal com os quartis de 25% e 75% formando uma caixa ao redor da mediana que contém metade das observações (Zuur et al., 2010). Os valores anormais detetados foram corrigidos para o melhor ajuste do modelo nas fases subsequentes.

Em seguida realizou-se o teste de correlação de Person (r), por forma a verificar o nível de correlação entre as variáveis explicativas, considerando um índice absoluto superior a 70% ( $-70 < r < +0,70$ ) e, um dos pares das co-variáveis com r absoluto  $> 70\%$  foi excluído no ajuste do modelo para evitar complicações na interpretação dos resultados (Dormann et al., 2013). Feito o teste de correlação de Person (Figura 3S, Anexo 3) observou-se que os seguintes pares de variáveis, variação da maré, concentração de ferro, silicato e alcalinidade apresentam um índice absoluto de correlação superior a 70% (Figura 3S, Anexo 3), por isso foram eliminadas na fase de ajuste do modelo.

O Modelo Aditivo Generalizado (Simon Wood, 2006) foi usado para prever o efeito das variáveis ambientais na agregação da biomassa (ganho do peso (Kg)) e na taxa de crescimento (TCR – velocidade de crescimento (%)) da espécie cultivada. Em estatística, GAM é um modelo linear generalizado no qual a variável resposta depende linearmente das funções suaves de algumas variáveis preditores. Desta feita avaliou-se a relação entre a variável dependente (Biomassa ou TCR) e as variáveis ambientais, adicionando-se uma função de suavização spline não-paramétrica para ajustes de variações não lineares, usando uma função “identity link” no pacote estatístico mgcv (Simon Wood, 2006). Para a seleção de variáveis explicativas foi utilizado o método progressivo, que consiste em ajustar uma variável de cada vez e foi se excluindo as variáveis não significativas, combinadas com a técnica de “tentativa e erro”, orientando-se nos seguintes critérios (Simon Wood, 2006): (i) – Se o valor de Critério de Informação Akaike (AIC, Akaike, 1974) e do GCV reduzirem com a eliminação da variável não significativa, (ii) inspeção gráfica para verificar se o intervalo de confiança não inclui zero em toda a linha de regressão e; (iii) o desvio explicado mostrar melhorias no desempenho do modelo quando as variáveis não significativas forem eliminadas. Finalmente, foram selecionados os seguintes modelos:

**(1) Acumulação da Biomassa (Biomassa):**

$$\begin{aligned} \text{Biomassa} \sim & s(\text{Temperatura}, k = 4, bs = \text{“cs”}) + \\ & s(\text{Maré}, k = 4, bs = \text{“cs”}) + \\ & s(\text{Concentração de Oxigénio}, k = 4, bs = \text{“cs”}) + \\ & s(\text{Concentração de Fosfato}, k = 4, bs = \text{“cs”}) + \\ & s(\text{Concentração de Nitrato}, k = 4, bs = \text{“cs”}) + \\ & s(\text{Carbono Inorgânico Dissolvido}, k = 4, bs = \text{“cs”}) + \\ & s(\text{pH}, k = 4, bs = \text{“cs”}) \end{aligned}$$

**(2) Taxa de Crescimento Relativo (TCR):**

$$\ln(\text{TCR}+1) \sim s(\text{Temperatura}, k = 4, bs = \text{“cs”}) +$$

$$\begin{aligned}
& s(\text{Concertação de Nitrato}, k = 4, bs = "cs") + \\
& s(\text{Energia da Onda}, k = 4, bs = "cs") + \\
& s(\text{Carbono Inorgânico Dissolvido}, k = 3, bs = "cs") + \\
& s(\text{pH}, k = 4, bs = "cs") + \\
& s(\text{semanas de Cultivo}, k = 3, bs = "cs")
\end{aligned}$$

Nos modelos, o  $s$  é a função suavizada do spline penalizado, para as interações simples e covariáveis ambientais. As covariáveis simples foram ajustadas com spline de regressão cúbica ( $cs$ ) para modelar relacionamentos não lineares. O “ $cs$ ” garante que um spline de regressão com encolhimento seja aplicado e um suavizador pode ter zero graus de liberdade e todos os suavizadores com zero graus de liberdade podem ser descartados simultaneamente do modelo (Zuur et al., 2010). A dimensão,  $k$ , representando os graus máximos de liberdade para cada termo suave, foi definida como  $k = 4$ . Para melhor aferir a adequabilidade do ajuste do modelo considerou-se a validação cruzada  $k$ - grupos, e neste caso foi considerado o  $k=10$  (James G et al., 2013). Assim, cada modelo foi ajustado em  $k-1$  grupo e um dos subgrupos de dados foi usado para validar o modelo (Gonçalves, 2021; James G et al., 2013). Para avaliar a precisão do modelo calculou-se o erro dos mínimos quadrados (RMSE) de modo a encontrar coeficientes que minimizam a diferença entre o valor observado e o valor predito, a correlação de Pearson ( $r$ ) para medir a relação estatística entre a variável observada e prevista pelo modelo, o índice de similaridade de Shonnan (Warren et al., 2008) entre os valores previstos e observados foram calculados para medir a precisão e o desempenho preditivo do modelo no ganho da biomassa e taxa de crescimento relativo da marcoalga *E. denticulatum* a partir do pacote *spaa* (Zhang, 2016).

No final, fez-se a visualização das curvas da variável resposta, onde foram ilustradas a relação da dependência parcial examinando o efeito das variáveis independentes (variáveis ambientais) mantidas em sua média para criar intervalos de previsão com um nível de confiança de 95% sobre a variável dependente (Biomassa ou TCR), por forma a comprar a relação existente entre as variáveis ambientais e a variável resposta.

## 4. Resultados

As biometrias quinzenais sobre o crescimento das macroalgas da espécie *E. denticulatun* exibiram uma tendência crescente linear, isto é, durante a fase do cultivo observou-se que a média do peso das macroalgas aumentava semanalmente (Figura 5). Num período de cerca de 45 dias foi observado um acúmulo da matéria orgânica de cerca de 32.4 Kg resultante da diferença do peso inicial de 1.2Kg e o final de 33 Kg, com uma média de  $23 \pm 8.38$  Kg. As amostras da quarta e sexta semana foram caracterizadas por uma maior variabilidade, contendo valores discrepantes na distribuição da biomassa, isto é, alguns ensaios experimentais do cultivo da espécie *E. denticulatum* não tiveram um melhor desempenho no crescimento (valores anormais mínimos) enquanto que em algumas cordas da experiência o crescimento foi bastante elevado, ilustrado pelas anomalias da biomassa acima do valor máximo da distribuição (Figura 5).

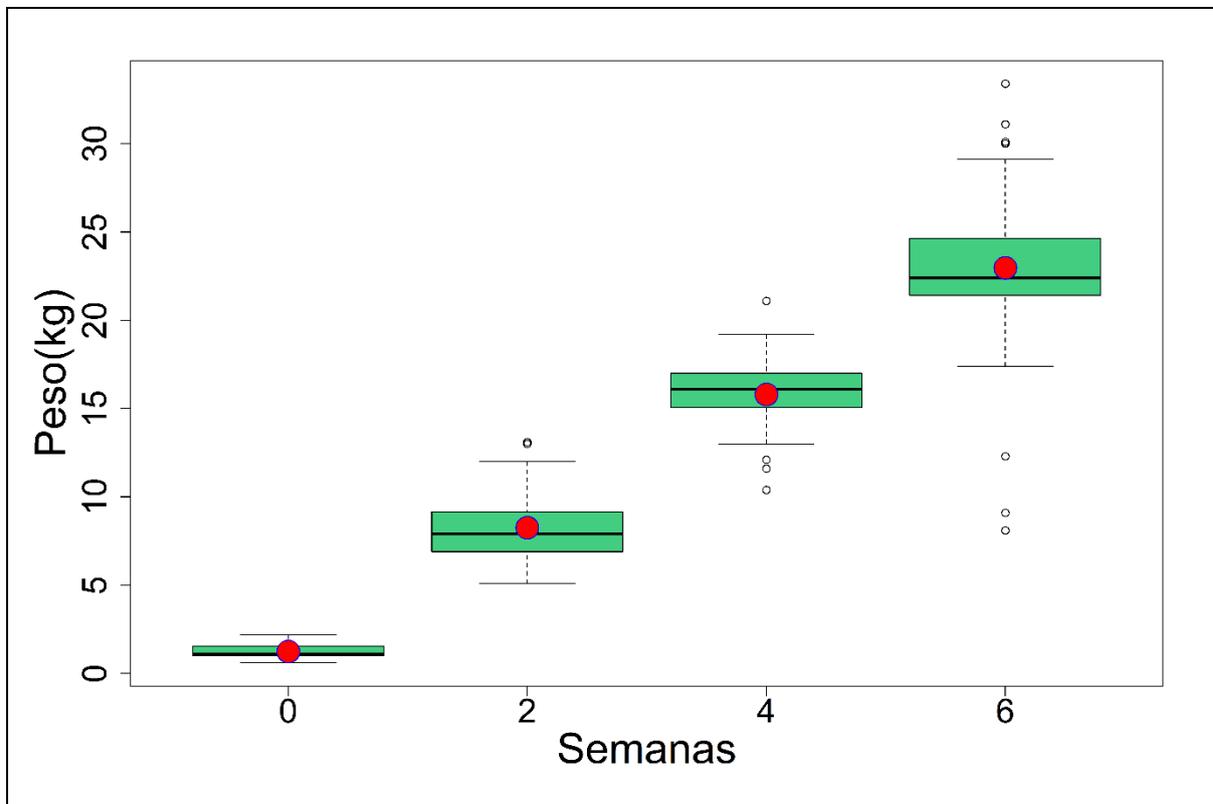


Figura 5: Acumulação da biomassa da macroalga *E. denticulatum* durante 6 semanas de cultivo nos dois métodos.

### 4.1 Performance do Modelo

A relação entre a variação do ganho do peso (biomassa) e taxa de crescimento relativa (TCR) com os parâmetros ambientais do local de cultivo obtida a partir do modelo GAM foi resumida na Tabela 1. O desempenho do modelo para biomassa assim como para TCR (velocidade de crescimento relativa) foi adequado, isto é, para o biomassa, o erro dos mínimos quadrados (RMSE ~12.2%), critério de

informação de Akaike (AIC~913.54), a validação cruzada generalizada (GVC~ 1.55), correlação de Pearson (r~98%), o índice de similaridade (Shonnan índice D~96%) e o desvio total explicado pelo modelo foi de 97.40% (Tabela 2). Para a TCR o RMSE ~3.45%, AIC~163.30, GCV~0.12, Shonnan índice D~95% e o desvio total explicado pelas variáveis preditoras no modelo foi de 90.40%. A inspeção gráfica dos dois modelos observou razoavelmente os princípios de normalidade dos residuais, homogeneidade de variância e a relação linear entre os valores modelados e observados (Figura 2S, Anexo 2 e Figura 3S, Anexo 3). Todas variáveis selecionadas pelos modelos da acumulação da biomassa assim como para a taxa de crescimento relativa foram altamente significativas ( $p < 0,001$ , Tabela 2).

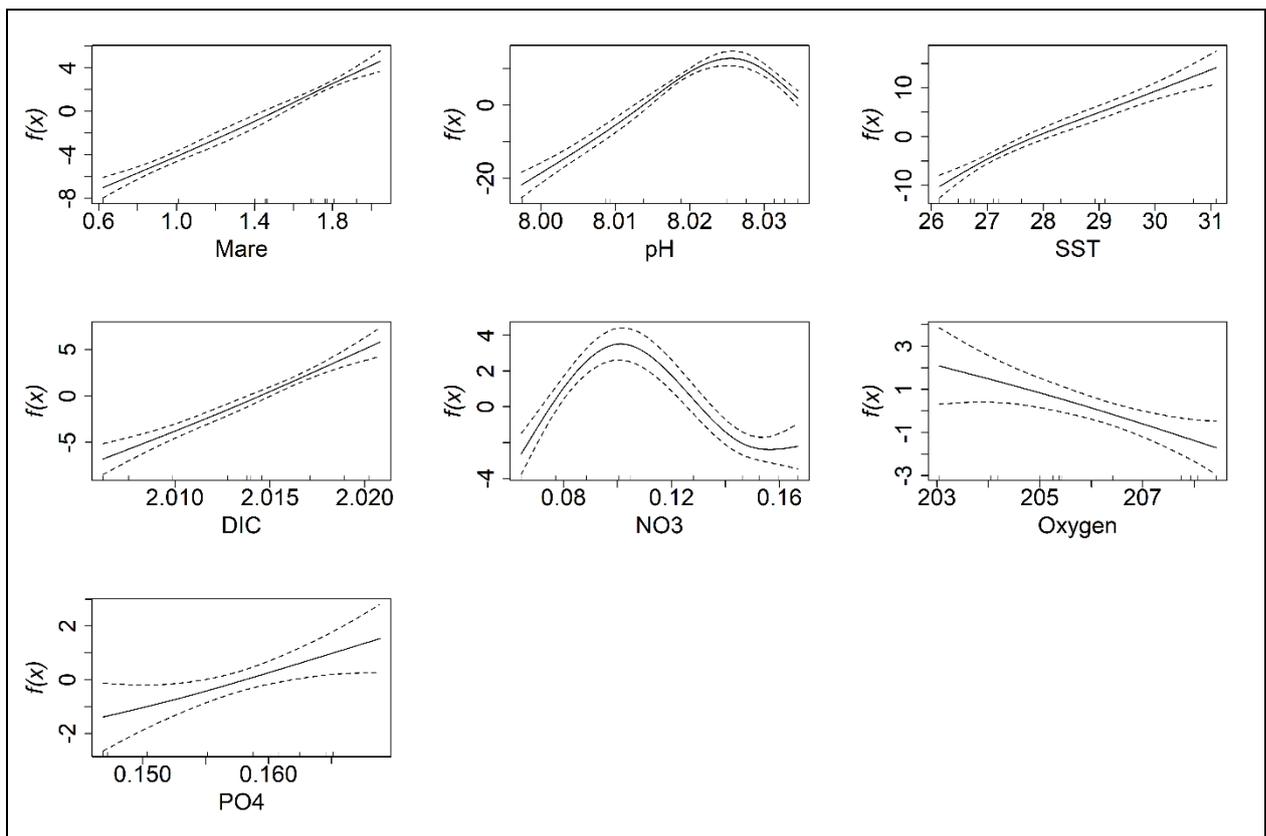
**Tabela 2:** Resultados estatísticos do GAM selecionado para acumulação da biomassa e a Taxa de crescimento da macroalga *E. deticulatum* no distrito de Mossuril. AIC- Critério de Informação Akaike, GCV- validação cruzada generalizada, n- tamanho da amostra, EDF- graus de liberdade efetivos, F-Estatístico- razão entre o desvio explicado e não explicado pela co-variável, Dev. Expl.- é o desvio explicado por todas as variáveis no modelo, r-coeficiente de Pearson, RMSE- erro quadrado médio, Shonnan Index D- Grau de similaridade entre as observações e valores previstos pelo modelo, MareMin- altura da maré mina no mar, SST- Temperatura superficial da água do mar, O2- Oxigênio dissolvido na coluna de água, pH- potencial hidrogeniônico, NO3- nitrato dissolvido na coluna de água, PO4 – fosfato dissolvido na coluna de água, DIC- carbono inorgânico dissolvido na coluna de água, swv - energia da onda, semanas- indicam o tempo de cultivo.

| <b>Modelo Ajustado com a família exponencial identity link</b> |   |                |                      |  |                |                       |
|--|---|----------------|----------------------|--|----------------|-----------------------|
| <b>Parâmetros</b>  | <b>Modelo de Crescimento</b>                    |                |                      | <b>Modelo da Taxa de Crescimento (TCR-<br/>Velocidade de Crescimento Semana)</b> |                |                       |
|  | <b>(Acumulação da Biomassa / Ganho do Peso)</b> |                |                      |  |                |                       |
| R-sq.(adj)   | 0.97  |                |                      | 0.90   |                |                       |
| Dev. Expl. (%)   | 97.50   |                |                      | 90.40  |                |                       |
| GCV  | 1.55  |                |                      | 0.12   |                |                       |
| AIC  | 913.54  |                |                      | 163.30   |                |                       |
| n  | 308.00  |                |                      | 222.00   |                |                       |
| <b>Residual df</b>   | 265.40  |                |                      | 213.17   |                |                       |
| <b>Shonnan Index-D</b>   | 0.96  |                |                      | 0.95   |                |                       |
| <b>Rho</b>   | 0.98  |                |                      | 0.97   |                |                       |
| <b>RMSE</b>  | 12.2  |                |                      | 3.45   |                |                       |
| <b>Variáveis</b>   | <b>EDF</b>                                      | <b>P-Value</b> | <b>F-estatístico</b> | <b>EDF</b>   | <b>P-Value</b> | <b>F- Estatístico</b> |
| MareMin  | 1.2461  | < 0.001        | 168.02               | -  | -              | -                     |
| O <sub>2</sub>   | 0.9819  | < 0.001        | 2.75                 | -  | -              | -                     |
| PO <sub>4</sub>  | 0.5973  | < 0.001        | 2.13                 | -  | -              | -                     |
| NO <sub>3</sub>  | 2.8792  | < 0.001        | 32.88                | 2.92   | < 0.001        | 89.08                 |
| pH   | 3.0000  | < 0.001        | 114.14               | 0.84   | < 0.001        | 4.45                  |
| Dic  | 1.3150  | < 0.001        | 33.82                | 0.61   | < 0.001        | 6.74                  |
| SST  | 1.5886  | < 0.001        | 41.01                | 2.15   | < 0.001        | 39.22                 |
| <b>SWN</b>   | -   | -              | -                    | 0.97   | < 0.001        | 11.82                 |
| <b>Semanas</b>   | -   | -              | -                    | 0.40   | < 0.001        | 3.20                  |

#### 4.2 Efeito das variáveis ambientais sobre o crescimento de *E. denticulatum*

O efeito das variáveis ambientais selecionadas pelo GAM para a biomassa da espécie foi ilustrado através da regressão múltipla (Figura 6), que explica a variação da biomassa acumulada da macroalga  $f(x)$  ao longo das semanas de cultivo em rede tubular em Nacuxa no distrito de Mossuril. O crescimento da macroalga *E. denticulatum* mostrou uma relação linear positiva com altura da maré (0.6 m – 2 m), a temperatura (SST, 26-31 °C), carbono inorgânico dissolvido (DIC) e concentração de fosfato, enquanto que foi negativamente correlacionado com concentração de oxigênio dissolvido (Figura 6). Em relação a variação de pH, a espécie mostrou também uma relação linear positiva em faixas de alcalinidade menor que 8.025 e, acima deste valor (pH~8.025) *E. denticulatum* ilustrou uma tendência de perda de biomassa. Porém, a concentração do nitrato ilustrou melhor desempenho no crescimento da espécie na faixa de 0.08 -0.12 mmolL<sup>-1</sup> (Figura 6).

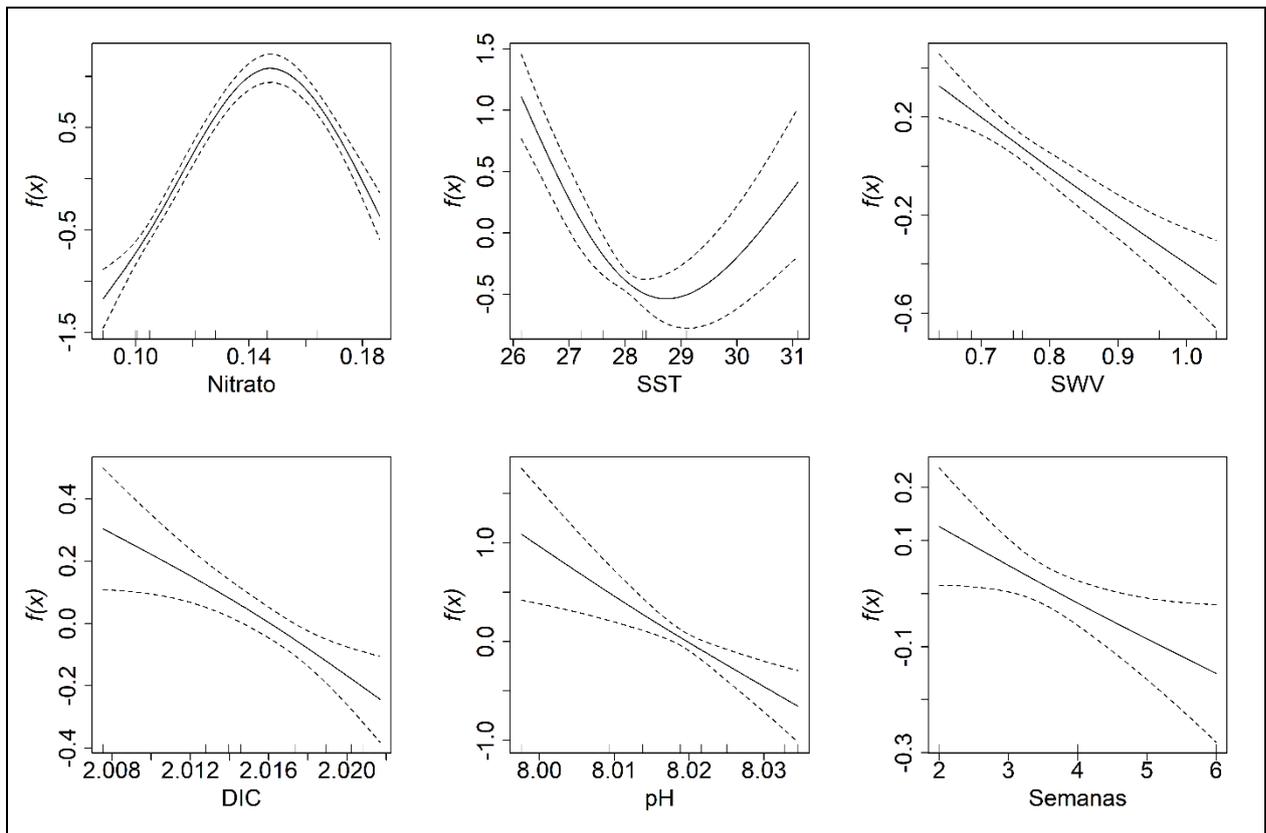
Todas as variáveis selecionadas pelo modelo foram altamente significativas (p-value < 0.001) (Tabela 2). Contudo, o rácio entre o desvio explicado e não explicado (F-estatístico) pela co-variável revelou que a altura da maré foi a variável que mais contribui no desvio explicado do modelo (F-estatístico ~168), seguida do pH (F-estatístico ~114), SST (F-estatístico ~41), DIC (F-estatístico ~33) , NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (F-estatístico ~32) ao passo que o oxigênio dissolvido (O<sub>2</sub>) e fosfato (PO<sub>4</sub>) foram as variáveis com menor contributo no desempenho do modelo cujos valores de F-estatístico foram ~3 e 2 respectivamente (Tabela 2, Figura 1S-Biomassa Anexo 1).



**Figura 6:** Influência das variáveis ambientais na biomassa da macroalga *E. denticulatum* em Nacuxa, distrito de Mossuril. O eixo y representado por  $f(x)$  que é uma função suavizada que explica a variação do ganho do peso da macroalga. SST - Temperatura superficial da água do mar, Mare - variação da altura da maré mínima no mar,  $O_2$  - Oxigênio dissolvido na coluna de água, pH - potencial hidrogeniônico,  $NO_3^-$  - nitrato dissolvido na coluna de água e  $PO_4$  - fosfato dissolvido na coluna de água, DIC - carbono inorgânico dissolvido na coluna de água. A linha contínua indica a variação do crescimento e as linhas tracejadas inferior e superior nos gráficos indicam os limites de confiança de 95%.

Quando foi modelada a taxa de crescimento relativa (TCR) da espécie *E. denticulatum*, o GAM selecionou a temperatura (SST), concentração do nitrato ( $NO_3^-$ ), energia da onda (SWV), carbono inorgânico dissolvido (DIC), potencial hidrogeniônico (pH) e tempo de cultivo (semanas) como variáveis explicativas da velocidade de crescimento em Mossuril (Figura 7). Assim, o modelo ilustrou que a TCR relaciona-se inversamente com  $SST < 29^\circ C$ , SWV, DIC, pH, e tempo de cultivo, isto é, quando o valor das variáveis aumenta a taxa de crescimento tende a reduzir (Figura 7). Porém, em intervalos de  $SST > 29^\circ C$  a TCR tende a aumentar e exibiu uma faixa ótima em intervalos de concentração de nitrato 0.12- 0.17  $mmol L^{-1}$ .

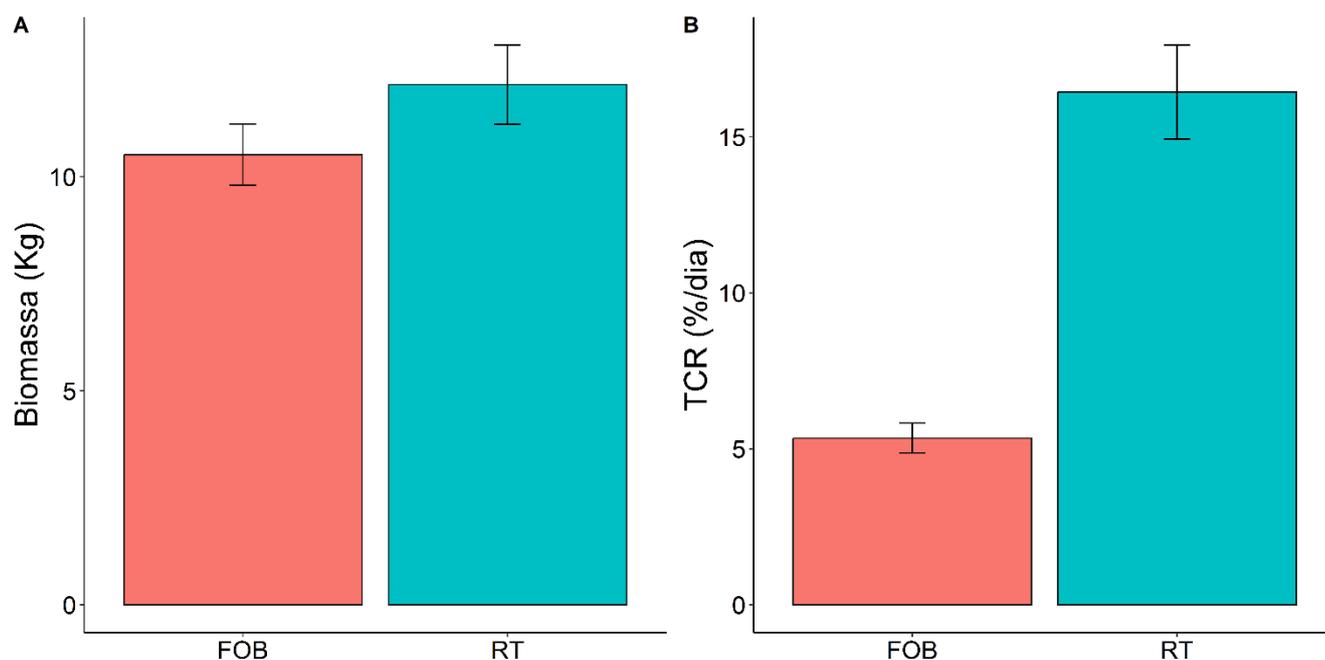
Em relação as variáveis selecionadas pelo modelo, todas foram altamente significativas ( $p$ -value  $< 0.001$ ) (Tabela 2). No entanto, o F-estatístico revelou que as co-variáveis  $NO_3^-$  (F-estatístico ~89), SST (F-estatístico ~39) e energia da onda (SWN, F-estatístico ~12) foram as que mais explicaram a variação do TCR (Tabela 2). DIC (F-estatístico ~7), pH (F-estatístico ~5) e semanas de cultivo (F-estatístico ~3) tiveram menor contribuição no desempenho do modelo (Tabela 2, Figura 1S -TCR, Anexo 1).



**Figura 7:** Influência das variáveis ambientais na taxa de crescimento relativa (TCR) da macroalga *E. denticulatum* em Nacuxa distrito de Mossuril. O eixo y representada pelo  $f(x)$  que é uma função suavizada que explica a variação taxa de crescimento da macroalga. SST- Temperatura superficial da água do mar, pH- potencial hidrogeniônico, NO<sub>3</sub>- nitrato dissolvido na coluna de água e DIC- carbono inorgânico dissolvido na coluna de água. A linha contínua indica a variação da taxa de crescimento e as linhas tracejadas inferior e superior nos gráficos indicam os limites de confiança de 95%.

### 4.3 Comparação dos Métodos de Cultivo

A análise comparativa dos métodos de cultivo de rede tubular (RT) e fixação do fundo revelou que o ganho de peso assim como a taxa de crescimento da espécie *E. denticulatum* foi maior no cultivo em rede tubular (Figura 8). Em relação a biomassa acumulada da espécie, apesar dos dois sistemas mostrarem diferenças nas médias do ganho do peso, isto é, a média de RT ( $12.16 \pm 11.34$  kg) é relativamente maior em relação ao *tie-tie* ( $10.52 \pm 11.22$  kg), o teste de student não detectou diferenças significativas no crescimento *E. denticulatum* para o período de cultivo ( $t = -1.4015$ ,  $df = 392$ ,  $p\text{-value} > 0.05$ ) (Figura 8A). Contudo, as médias da taxa de crescimento relativa entre os dois sistemas de cultivo, mostraram que o método de rede tubular teve maior valor da taxa de crescimento relativa ( $16.44 \pm 18.48$  %/dia) comparativamente ao método de *tie-tie* ( $5.45 \pm 7.48$  %/dia), e estas diferenças observadas foram comprovadas pelo teste de student a nível de confiança de 95 % ( $t = -7.0089$ ,  $df = 179.45$ ,  $p\text{-value} < 0.05$ ) (Figura 8B).



**Figura 8:** Média de ganho de peso (A), taxa de crescimento relativo (B) e os respectivos desvios standard da macroalga *E. denticulatum* ao longo dos 45 dias de cultivo na região norte de Moçambique. RT- sistema de cultivo em rede tubular Tie-Tie - sistema de cultivo em tie-tie.

## 5. Discussão

Este estudo teve como objetivo, relacionar o crescimento da macroalga *Euchema denticulatum* com as variáveis físico-químicas ambientais no sistema de cultivo em ambientes costeiro marítimo da região norte de Moçambique aplicando o modelo aditivo generalizado (GAM). Portanto, foi aplicado o GAM usando dados in-situ de macroalgas cultivadas através do método de rede tubular (RT) e dados ambientais de observação por satélite para derivar as relações estatísticas entre co-variáveis ambientes e produção de algas marinhas da espécie *E. denticulatum*, selecionando factores ecológicos (co-variáveis físico-químicos) explicativos para cada modelo de acumulação de biomassa e taxa de crescimento relativa (Tabela 2). O GAM explicou cerca de 97% de acúmulo de biomassa e cerca de 90% da taxa de crescimento. Os altos valores de desvio explicado assim como as co-variáveis selecionadas já foram evidenciados em outros estudos de macroalgas usando GAM (Sarker et al., 2021; Tasnim et al., 2024; van Son et al., 2020). A capacidade preditiva de GAM foi avaliada usando o procedimento recomendado de validação cruzada de k-grupos ( $RMSE \leq 12\%$ ;  $r \geq 97\%$  e  $D \geq 95\%$ ) e inspeção gráfica (ex: Wood, 2006; Zurr et al., 2010) e os resultados de validação são considerados adequados e as co-variáveis selecionadas podem ter efeito directo para espécie (van Son et al., 2020) em ambos os modelos de ganho do peso e taxa de crescimento nos locais de cultivo.

Entre os factores ecológicos determinantes para o cultivo de *E. denticulatum*, no modelo de biomassa acumulada, a variação da altura da maré foi a variável com maior contributo no desvio explicado (F-statistic ~168), relacionando-se positivamente com acumulação da biomassa, isto é, quando o nível da altura da maré é menor (vanzante) a biomassa é muito baixa e aumenta com a elevação da altura da maré (enchente). A menor biomassa observada nas marés baixas pode estar associada a exposição da macroalga *E. denticulatum* a alta radiação solar e a temperaturas intensas do ar atmosférico que afectam metabolismo fisiológico e as enzimas fotossintéticas no crescimento das macroalgas durante a emersão (Cappelatti et al., 2020; Román et al., 2020), principalmente para as espécies que são cultivadas ou colonizam habitats interditaes com variação da altura e ondas de marés (van Son et al., 2020). Um dos problemas maiores que a espécie em estudo assim como as outras espécies de macroalgas das zonas interditaes enfrentam estão relacionadas com a dissecação durante a emersão devido a exposição a altas temperaturas do ar atmosférico na vazante (Martinez et al., 2012), mas também uma imersão prolongada das marés vivas pode afectar a taxa fotossintética e o metabolismo fisiológico devido ao aquecimento da água do mar (Román et al., 2020). Neste estudo, a imersão com o aumento da altura da maré foi favorável para acumulação da biomassa da espécie.

Uma outra variável que teve maior contributo no modelo de acumulação da biomassa foi a variação do pH (F-statístico ~ 125), que correlacionou-se positivamente com o crescimento da espécie em cultivo. Este resultado esta em concordância com o estudo de Tasnim et al. (2024), onde observou que o aumento de pH do neutro para a faixa alcalina é favorável para o crescimento de macroalgas das zonas costeiras. Porém, experiências realizadas em laboratórios, mostraram que a redução de pH abaixo do neutro, isto é, em direção a faixa ácida tem efeito na calcificação das macroalgas e consequentemente retardar crescimento das espécies de macroalgas costeiras (Guenther et al., 2022). Os valores de pH observados nestes estudos são considerados óptimos e com padrões normais da água do mar que tem demonstrado um sucesso no cultivo de *E. denticulatum* (Melendres & Largo, 2021). Contudo, a taxa de crescimento relativo (TCR) relacionou-se inversamente com o aumento de pH, ou seja, a TCR foi elevada em torno de pH~8, reduzindo significativamente com o incremento 0.01- 0.03 unidades. Esta constatação difere do resultado dos estudos realizado em Tasmânia com as macroalgas marron, onde o pH não mostrou nenhum efeito na TCR, mas influenciou a taxa fotossintética na produção e acumulação da biomassa (Britton et al., 2016). Entretanto, para o cultivo de macroalgas marinhas os problemas estão relacionados com ambientes acidificados (pH<7). Em ecossistemas ácidos, as macroalgas reduzem a taxa de reprodução, cria o stress fisiológico, afecta o metabolismo das células, a taxa fotossintética e diminui o brotamento dos talos das macroalgas (Britton et al., 2016; Roleda et al., 2012). Mas no presente estudo o pH variou entre 8-8.05 que caracteriza a qualidade de água nos padrões normais para o cultivo de macroalgas. A temperatura superficial da água do mar (SST) variou

no intervalo de 26 °C – 31 °C e correlacionou-se linearmente de forma positiva com a acumulação da biomassa de *E. denticulatum*. Este resultado já foi verificado em outros estudos em águas tropicais cuja a temperatura variou de 8°C -36°C (Borlongan et al., 2017; Lideman et al., 2013a), isto é, a faixa de tolerância térmica da espécie é ampla, e o presente estudo foi realizado dentro do padrão óptimo ecológico da temperatura para o crescimento que é considerado ~31 °C (Borlogan et al.,2017), revelando que a espécie pode estar bem adaptada as águas costeiras com altas temperaturas para actividades fotossintéticas em diversos ambientes de cultivo. Portanto, o modelo GAM detectou adequadamente acumulação da biomassa da espécie em relação a variação da temperatura para o local de estudo que é uma região tropical. Porém, a taxa de crescimento relativa se relacionou positivamente com as temperaturas superiores a 29 °C, comprovando as teorias de que a taxa de crescimentos da espécie *E. denticulatum* é melhor em ambientes tropicais de ~31°C (Borlongan et al., 2017; Ndobe, Yasir, Salanggon, Wahyudi, Adel, et al., 2020). Também, a temperatura afeta todos os aspectos da fisiologia das algas marinhas através da sua regulação da actividade enzimática, taxa de produtos das reações químicas e a taxa de difusão de nutrientes através das camadas superficiais das membranas (Roleda & Hurd, 2019); assim como a qualidade e quantidade sintetizada de carragina que é dos derivados de elevado valor socioeconómico desejado na cadeia produtiva e de comercialização de macroalgas da ordem Gigartinales (Borlongan et al., 2017; Ndobe, Yasir, Salanggon, Wahyudi, Ederyan, et al., 2020; Tasnim et al., 2024). Além disso, a temperatura é um prox de outras variáveis que influenciam o crescimento das macroalgas. Por exemplo, o aumento do SST pode induzir a frequência, a intensidade e duração das ondas de calor (Román et al., 2020).

Em relação ao carbono inorgânico dissolvido (DIC), GAM revelou uma relação linear positiva com a acumulação da biomassa fresca da espécie *E. denticulatum* e uma relação inversa com a TCR. Estas relações podem ser explicadas pelo facto de que as macroalgas absorvem directamente o dióxido de carbono e/ou bicarbonato (DIC -  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_2$ ) para a fotossíntese, sendo o  $\text{CO}_2$  o substrato final para a enzima RuBisCO (Cornwall et al., 2017). Também, o carbono quanto o nitrogênio são necessários para um equilíbrio de crescimento, por isso, a concentração de DIC na água do mar pode afetar algas marinhas na absorção de nitrogênio e conseqüente afectar no crescimento da macroalga. Por exemplo, as experiências laboratoriais com as macroalgas demonstraram que a absorção do  $\text{NO}_3^-$ , tem sido maior em culturas enriquecidas com  $\text{CO}_2$  comparativamente aos ambientes onde o suplemento de  $\text{CO}_2$  é baixo (Zou, 2005). Além disso, a maior concentração de  $\text{CO}_2$  também melhora actividade do nitrato redutase (NR) durante o período de luz. Maior actividade máxima de NR, maior afinidade por  $\text{NO}_3^-$ , e um maior volume da biomassa foi observada em talos cultivados com alto teor de  $\text{CO}_2$ , indicando eficiência da actividade enzimática sob alta concentração de  $\text{CO}_2$  (Zou 2005). Portanto, a relação linear observada

entre acumulação da biomassa de *E. denticulatum*, mostra também que o DIC que é absorvido na forma de CO<sub>2</sub> quando a concentração no mar é elevada requer menor dispêndio energético comparativamente a outras formas de DIC disponíveis no mar (Cornwall et al., 2017), sendo favorável para o crescimento da macroalga, tal como foi constatado neste estudo. Apesar da relação linear entre a biomassa e DIC, a TCR mostrou que a velocidade de absorção de DIC é maior no ambiente de baixa saturação e, vai diminuído com o nível de saturação do DIC. Contudo, a espécie *E. denticulatum* mostrou alta tolerância em relação a níveis elevados de DIC (CO<sub>2</sub> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) que são responsáveis pela redução de pH, isto é, induzido a acidificação dos oceanos (Britton et al., 2016), a maior produtividade de biomassa de *E. denticulatum* em habitats com altos níveis de acidificação devido a altas concentrações de DIC já foi observada em ambientes equatoriais e, a espécie revelou melhor adaptação as alterações climáticas globais, (Ndobe et al., 2020) sendo scioecologicamente favorável e adequada para a interação entre o homem e os ecossistemas marinhos.

Além das co-variáveis discutidas previamente, o modelo GAM estimou que diferentes concentrações de nutrientes (nitrato e fosfato) são impulsionadores importantes para o cultivo de algas marinhas (Cabrera et al., 2021), uma vez que na disponibilidade da luz e do carbono inorgânico (DIC), regulam a fotossíntese e crescimento das macroalgas. Com base no presente modelo, compostos nitrogenados são o nutriente mais crítico para a produção de algas marinhas, como são para as plantas terrestres, porque são os principais componentes no metabolismo das plantas como constituintes de proteínas, clorofila, ácidos nucleicos, coenzimas e metabólitos secundários (MacArtain et al., 2007; Kusuma et al., 2022;), sendo por isso tidos como limitantes na produção de macroalgas, embora em outros ambientes o fosfato também pode ser limitante (Roleda & Hurd, 2019). Por outro lado, o modelo GAM demonstrou que em ambientes onde a concentração de nutrientes é elevada, a espécie *E. denticulatum* pode atingir o estado de saturação da absorção nitrato (Narvarte et al., 2022), facto este ilustrado na curvas de biomassa e taxa de crescimento da espécie em estudo (Figura 4 e 5). Tanto as concentrações de nitrato assim como de fosfato são bastante importantes para as macroalgas, quando é atingido o maior desenvolvimento vegetativo regulando os padrões de desenvolvimento das espécies ao longo do ciclo anual (Cabrera et al., 2021). Quando a temperatura e a iluminação não são favoráveis ao crescimento, a macroalga simplesmente acumula esses compostos nas células e à medida que as condições ambientais mudam, estes compostos armazenados são ativamente utilizados no seu crescimento (Roleda & Hurd, 2019; Cabrera et al., 2021;). A espécie *E. denticulatum* assim como as outras espécies de eucemoides servem como extrativas ou biofiltradoras de nitrato e fosfato, utilizando o excesso de nutrientes dissolvidos nos ecossistemas marinhos, reduzindo assim o risco de eutrofização e promovendo aquacultura sustentável (Narvarte et al., 2023).

A energia das ondas (SWV) correlacionou-se linearmente de forma negativa com a taxa de crescimento (TCR), comprovando a teoria de que alta intensidade da energia da onda exerce um stress fisiológico negativo para a taxa de crescimento das macroalgas (Román et al., 2020). A região costeira norte onde foi realizado o estudo é influenciado por ondas internas geradas no oceano e pela circulação atmosférica no canal de Moçambique (Magalhaes et al., 2014) e possivelmente podem ter influenciado na relação negativa da taxa de crescimento observado. Apesar da correlação negativa observada entre TCR e SWV, *E. denticulatum* foi tolerante e adaptada a ação das ondas, visto que a biomassa produzida e a taxa de crescimento no final do ciclo de cultivo foram adequadas e similares a outros ambientes onde a intensidades das ondas é moderada ( Taylor & Schiel, 2010; Christopher et al., 2012; Caesar et al., 2021). Por outro lado, a força da onda pode ter contribuído indirectamente para a taxa de crescimento da *Euchema denticulatum* devido ao seu poder de dispersar os predadores herbívoros tornando o ambiente seguro e menos vulnerável para o crescimento da espécie no momento do cultivo (Christopher et al., 2012; Taylor & Schiel, 2010)

O oxigénio dissolvido foi a variável que se relacionou inversamente com acumulação da biomassa de *E. denticulatum* entre as co-variáveis preditoras selecionadas pelo GAM (Figura 4), contrariando a teoria fotossintética, que defende que as reações bioquímicas da produção da matéria orgânica ocorrem com a libertação de moléculas de O<sub>2</sub> (Lalli & Parsons, 2004; Sarmiento & Gruber , 2007). Como a experiência de cultivo teve vários ciclos, pode-se presumir que o efeito das ondas, correntes oceânicas e o próprio sistema fotossintético da *E. denticulatum* podem ter suprido o volume de oxigénio que se tornou saturante no local de cultivo (Caesar et al., 2021; Román et al., 2020). E a saturação de oxigénio em ambientes onde a intensidade da luz também é saturada, inibe a fixação de CO<sub>2</sub> e consequentemente a redução da taxa fotossintética que esta relacionada com o processo da produção e acumulação da biomassa (Björkman, 1966; Crowder et al., n.d.). Provavelmente, as enzimas fotossintéticas de *E. denticulatum* podem ter a composição similar as espécies cuja enzima RuBisco é inibida com alta saturação de oxigénio, por isso a relação inversa observada entre a cumulação da biomassa e oxigénio dissolvido na água (Figura 4). Por outro lado, um ambiente com bom suprimento de oxigénio, melhora a qualidade das água, bem como a atração dos peixes que tem efeito de herbívora (Yahya et al., 2020), causando a redução da biomassa das macroalgas.

Semanas de cultivo foram incluídas para elucidar alguns processos ou parâmetros que não foram considerados no modelo de biomassa e taxa de crescimento de *E. denticulatum*, tais com turbidez, matéria orgânica suspensa, velocidade das correntes, variação da intensidade luminosa entre outros processos que influenciam no crescimento de macroalgas (Cornwall et al., 2017; Lideman et al., 2013b; Sarker et al., 2021; Kregting et al., 2023; Tasnim et al., 2024). Por exemplo, é importante notar que a quantidade de luz solar que penetra na água é determinada pela sua turbidez e partículas solidas

suspensas, tornando a transparência da água um factor crítico no crescimento das algas marinhas (Sarker et al., 2021; Tasnim et al., 2024). As correntes da água regulam o fornecimento em maior escala de nutrientes na água do mar e aumentam a produtividade das macroalgas em correntes de monções devido ao transporte de nutrientes e matéria orgânica dissolvida, comparativamente as correntes estacionárias (Cornwall et al., 2017; Kregting et al., 2023). Como as algas marinhas absorvem nutrientes diretamente da água do mar para o seu crescimento, o movimento da água desempenha um papel crucial para a produtividade das algas (Cornwall et al., 2017). A forte corrente de água pode remover as algas do substrato através das ondas e, assim, controlar o assentamento e respectiva distribuição das macroalgas nos ecossistemas (Hurd, 2000). Além disso, através da ressuspensão de sedimentos, a corrente de água pode impedir a penetração da luz na água do mar e, assim, controlar o crescimento de algas marinhas devido a inibição fotossintética. Porém, a intensidade e a duração da luz solar é fundamental para o processo fotossintético que é responsável pela produção da biomassa e crescimento das macroalgas (Kasim et al., 2021; Lideman et al., 2013b), embora a alta radiação pode causar a desnaturação das enzimas fotossintéticas. Portanto, a relação inversa da TCR de *E. denticulatum* observada ao longo das semanas de estudo pode estar associado a rápida taxa de assimilação e conversão de nutrientes e energia radiante em matéria orgânica ou energia química para o crescimento nos primeiros estágios do cultivo da espécie (Gerung & Ohno, 1997), mas a produtividade final da biomassa foi adequada (Figura 4).

Os dados do presente estudo, foram recolhidos com uso de dois métodos de cultivo (RT- rede tubular e monoline- *tie-tie*). Durante o período de estudo, verificou-se que o método de RT teve maior taxa de crescimento comparativamente ao método *tie-tie*. Estas diferenças observadas podem ser associadas as vantagens e desvantagens que cada método apresenta. Por exemplo, no método *tie-tie*, as macroalgas são suscetíveis a siltação dos sedimentos, destruição devido a ação das correntes e ondas de maior intensidade e por vezes sofrem ataque pelos herbívoros (Hendri et al., 2020; Yahya et al., 2020b) o que pode ter contribuído para o baixo desempenho na taxa de crescimento observado da espécie. Porém, no método RT, as macroalgas estão protegidas dentro da rede e o impacto destrutivo das correntes, ondas de marés e o efeito de herbívoros é reduzido, favorecendo a taxa de crescimento (Hendri et al., 2020). As vantagens desta técnica de RT providenciam resultados similares a produção de *E. denticulatum* usando a técnica de rede horizontal, devido ao efeito protetor contra herbívoros e assegurar que as macroalgas sejam cultivados em locais com profundidades que permitem a imersão durante a variação das marés (Munawan et al., 2021), resultando numa taxa de crescimento maior comparativamente ao método *tie-tie* (Puspita et al., 2020). Adicionalmente, os altos rendimentos de produtividade observados neste estudo no método RT, já foram observados em outros locais no cultivo de *E. denticulatum* (Brugere et al., 2020) e cultivo de *Kappaphycus alvarezii* (Góes & Reis, 2011). Porém, os

altos investimentos de aplicação da inovação tecnológica do método de RT são criticados para o empoderamento das mulheres que tem sido envolvidas em muitos países na maricultura de algas para renda das suas famílias (Brugere et al., 2020). Contudo, o método *tie-tie* pode ser modificado e continuar a ser aplicado com sucesso, usando o procedimento sugerido por Kimathi et al. (2018) que consiste na “suspensão de macroalgas por um mecanismo flutuante que foi projetado para garantir que algas marinhas permanecessem imersas e próximas da superfície da água”, favorecendo a rápida taxa de crescimento relativa que vai compensar a ação das ondas e herbívoros (Kimathi et al., 2018; Munawan et al., 2021) e pode minimizar o efeito de exposição à luz solar por longos períodos uma vez que o cultivo é realizado na zona litoral com flutuações das marés (Cornwall et al., 2017; Lideman et al., 2013b). Portanto, apesar das diferenças significativas observadas entre os dois métodos (*tie-tie* e RT) usados na local de estudo, ambos podem ser aplicados para o cultivo de *E. denticulatum*, desde que sejam introduzidas modificações inovadoras em cada método para melhorar o sucesso quantitativo e qualitativo da biomassa produzida.

Este estudo é relevante na medida em que analisa o efeito de alguns estressores climáticos que determinam a ocorrência e redistribuição das macroalgas da espécie *E. denticulatum* nos habitats marinhos e costeiros assim como a produção da espécie em sistemas de aquacultura. Por exemplo alguns estudos prévios mostram que a espécie *E. denticulatum* adapta-se melhor em regiões tropicais com elevadas temperaturas superficiais da água do mar (SST; 28°C-34°C), aumento da acidificação oceânica (pH 6-7) absorvendo elevadas taxas de carbono dissolvido no mar para fotossíntese (Christopher et al., 2012; Martinez et al., 2012) contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Porém, enquanto discute-se o efeito das macroalgas no sequestro do carbono como forma de mitigação das mudanças climáticas, estudos prévios já demonstraram que o conhecimento do ambiente do cultivo é fundamental para produção de biomassa em quantidade e qualidade desejada para extração de produtos e derivados para fins alimentares e indústria de cosméticos (Camus et al., 2019; Puspita et al., 2020), com um valor socioeconomicamente sustentável para o sector produtivo, quer seja industrial ou de subsistência. Por outro lado, discute-se as vantagens de aplicação de cada método e sua limitação nas comunidades, considerando que um dos grupos que realiza o cultivo de macroalgas nas regiões costeiras interditais são as mulheres para a subsistência (Brugere et al., 2020). Portanto, apesar de o método de RT ter tido maior taxa de crescimento que já foi comprovado em outros estudos (ex: Mahya et al., 2020; Kavale et al., 2021; Brugere et al., 2020) sugere-se que para o empoderamento socioeconómico das mulheres e equidade do género no cultivo de macroalgas nos países em via de desenvolvimento pode continuar a aplicar o método *tie-tie* modificado ou inovado para garantir maior produtividade nos padrões de qualidade para o mercado internacional.

## 6. Conclusões

- Para a produção da biomassa, GAM selecionou a variação da altura de maré, pH, temperatura superficial da água do mar, nitrato, fosfato, carbono inorgânico dissolvido e oxigénio dissolvido com variáveis preditoras, com um desvio explicado de ~97%,  $r^2$  ~98%, RMSE ~12% e Shonnan index D ~96%.
- E para a taxa de crescimento relativa as variáveis explicativas selecionadas pelo GAM foram nitrato, temperatura da superfície da água do mar, energia das ondas, carbono inorgânico dissolvido, pH e tempo de cultivo, tendo explicado ~90% da variação de TCR,  $r^2$  ~97%, RMSE ~3% e Shonnan index D ~95%.
- Todas variáveis selecionadas pelo modelo de produção da biomassa, foram altamente significativas (p-value < 0.001), pela seguinte ordem decrescente de influência de F-estatístico: Maré, pH, SST, DIC, SWN, DIC,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{PO}_4^-$ . Estas variáveis relacionaram-se positivamente com a produção da biomassa de *E. denticulatum*, excepto a concentração de nitrato cuja a faixa óptima foi observada no intervalo de 0.08 – 0.16  $\text{mgL}^{-1}$ .
- No modelo de TCR, todas variáveis selecionadas também foram altamente significativas (p-value < 0.001), pela seguinte ordem decrescente de influência de F-estatístico:  $\text{NO}_3^-$ , SST, SWN, DIC, pH e semanas de cultivo. A energia da onda, carbono inorgânico dissolvido, pH e tempo de cultivo foram negativamente relacionados com a taxa de crescimento da espécie, ao passo que em relação a concentração de nitrato, a TCR teve seu óptimo desempenho na faixa entre 0.12 – 0.17  $\text{mgL}^{-1}$  e quando a temperatura da água foi < 27°C e > 29°C.
- Entre os dois métodos de cultivo, a produção da biomassa foi relativamente maior na RT em relação a *tie-tie*, mas o t-test não detectou diferenças significativas entre os dois métodos (p-value > 0.05). Em relação a TCR, no sistema de cultivo usando RT, o ganho de peso diário foi elevado comparativamente ao sistema *tie-tie* e, estas diferenças foram comprovadas pelo t-test a nível de confiança de 95% (p-value < 0.05).

## 7. Recomendações e Futuras Linhas de Investigação

- Recomenda-se aos Maricultores para realizarem cultivos contínuos e amostragens consistentes sugeridas na literatura para melhorar a qualidade de dados que possam permitir uma análise mais aprofundada sobre o sistema de produção e os respectivos rendimentos em termos qualitativo e quantitativo da biomassa;
- Monitorar os parâmetros físico químicos nos locais de produção para a compreensão da qualidade de água no ambiente de cultivo e usar os dados para explicar as variações observadas na produção da biomassa e taxa de crescimento relativo in-situ;
- Recolher dados biológicos no local de cultivo, tais como agregação de invertebrados bentónicos, peixes pelágicos entre outros organismos que podem afectar a biomassa produzida por herbivoria, assim como avaliação do impacto da maricultura de *E. denticulatum* na regeneração ou recuperação de ecossistemas para biodiversidade marinha e costeira;
- Investigar com maior rigorosidade os métodos de cultivo que podem ser mais adequados em cada área, de acordo com a sua acessibilidade e sustentabilidade para as comunidades de baixa renda que na sua maioria são constituídas por associações ou organizações de mulheres;
- Realizar estudos para avaliar a contribuição da espécie na mitigação das mudanças climáticas e outros impactos socio ecológicos desta actividade;
- Estudar a cadeia de valores e mercados para massificação desta actividade que é socio ecologicamente viável para o ambiente e trazer resultados científicos que podem atrair investimentos neste sub-sector da aquacultura.
- Fazer a caracterização genética de populações e programas de selecção de cepas com características interessantes para cultivo, como altas taxas de crescimento e maiores rendimentos de ficocolóides

## 8. Referências Bibliográficas

- Arias-Echeverri, J. P., Zapata-Ramírez, P. A., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L., & Ocampo-López, C. (2022). Present and Future of Seaweed Cultivation and Its Applications in Colombia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/jmse10020243>
- Azanza, R., & spp, E. (2023). *Eucheuma spp. Summary Datasheet Type(s) Preferred Scientific Name*.
- Azanza, R. V., & Ask, E. (2017). Reproductive Biology and Eco-physiology of Farmed Kappaphycus and Eucheuma. In *Tropical Seaweed Farming Trends, Problems and Opportunities* (pp. 45–53). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63498-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63498-2_3)
- Björkman, O. (1966). The Effect of Oxygen Concentration on Photosynthesis in Higher Plants. *Physiologia Plantarum*, 19(3), 618–633. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1966.tb07046.x>
- Bonat, W., & Dallazuanna, H. (2008). *Universidade Federal Do Paran´Aparan´ Paran´A*. <http://saudavel.dpi.inpe.br>
- Borlongan, I. A. G., Gerung, G. S., Nishihara, G. N., & Terada, R. (2017). Light and temperature effects on photosynthetic activity of *Eucheuma denticulatum* and *Kappaphycus alvarezii* (brown and green color morphotypes) from Sulawesi, Indonesia. *Phycological Research*, 65(1), 69–79. <https://doi.org/10.1111/pre.12155>
- Britton, D., Cornwall, C. E., Revill, A. T., Hurd, C. L., & Johnson, C. R. (2016). Ocean acidification reverses the positive effects of seawater pH fluctuations on growth and photosynthesis of the habitat-forming kelp, *Ecklonia radiata*. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep26036>
- Brugere, C., Msuya, F. E., Jiddawi, N., Nyenje, B., & Maly, R. (2020). Can innovation empower? Reflections on introducing tubular nets to women seaweed farmers in Zanzibar. *Gender, Technology and Development*, 24(1), 89–109. <https://doi.org/10.1080/09718524.2019.1695307>
- Cabrera, R., Areces, A. J., Díaz-Larrea, J., García, L. N., & Cruz-Aviña, J. R. (2021). Influence of the Macronutrients N, P and K on the Agarophyte *Alsidium triquetrum* (S. G. Gmelin) Trevisan, during Experimental Culture. *American Journal of Plant Sciences*, 12(04), 573–585. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.124038>
- Caesar, L., McCarthy, G. D., Thornalley, D. J. R., Cahill, N., & Rahmstorf, S. (2021). Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14(3), 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Camus, C., Infante, J., & Buschmann, A. H. (2019). Revisiting the economic profitability of giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Ochrophyta) cultivation in Chile. *Aquaculture*, 502(August 2018), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.030>
- Cappelatti, L., Mauffrey, A. R. L., & Griffin, J. N. (2020). Functional diversity of habitat formers declines scale-dependently across an environmental stress gradient. *Oecologia*, 194(1–2), 135–149. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04746-1>

- Christopher, H., Kathryn M, A., Kyle W, D., Jennifer, J., Kordas, R., Theraesa, C., & Michael, G. (2012). Effects Of Climate Change On Global Seaweed Communities. *Journal of Phycology*, 48(5), 1064–1078. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>
- Cornwall, C. E., Reville, A. T., Hall-Spencer, J. M., Milazzo, M., Raven, J. A., & Hurd, C. L. (2017). Inorganic carbon physiology underpins macroalgal responses to elevated CO<sub>2</sub>. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/srep46297>
- Crowder, L. B., Frawley, T., & Low, N. H. N. (n.d.). *The significance of ocean deoxygenation for kelp and other macroalgae*. <https://www.researchgate.net/publication/338680185>
- Dormann, C. F. , et al. (2013). *Collinearity: A Review of Methods to Deal with It and a Simulation Study Evaluating Their Performance*. *Ecography (Cop.)*.
- Gerung, G. S., & Ohno, M. (1997). Growth rates of *Eucheuma denticulatum* (Burman) Collins et Harvey and *Kappaphycus striatum* (Schmitz) Doty under different conditions in warm waters of Southern Japan. *Journal of Applied Phycology*, 9(5), 413–415. <https://doi.org/10.1023/A:1007906326617>
- Gómez, I., & Huovinen, P. (2020). *Antarctic Seaweeds: Diversity, Adaptation and Ecosystem Services*. In *Antarctic Seaweeds: Diversity, Adaptation and Ecosystem Services*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39448-6>
- Gonçalves, T. (2021). *Modelo Aditivo Generalizado com função baseada num Perceptrão Multicamada: Estimção da função razão de possibilidades e respectivo intervalo de confiança*.
- Grolemund, G., & Wickham, H. (2011). *Journal of Statistical Software Dates and Times Made Easy with lubridate* (Vol. 40). <http://www.jstatsoft.org/>
- Guenther, R., Porcher, E. M. A., Carrington, E., & Martone, P. T. (2022). Effects of temperature and pH on the growth, calcification, and biomechanics of two species of articulated coralline algae. *Marine Ecology Progress Series*, 700, 79–93. <https://doi.org/10.3354/meps14166>
- Hendri, M., Apri, R., & Siantori, D. (2020). *Growth of Eucheuma denticulatum (spinosum) cultivated with a net bag verticulture method 1* (Vol. 13). <http://www.bioflux.com.ro/aacl>
- Hoguane, A. M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 7(1), 69–82. <https://doi.org/10.5894/rgci11>
- Hurd, C. L. (2000). Water Motion, Marine Macroalgal Physiology, and Production. *Journal of Phycology*, 36(3), 453–472. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.99139.x>
- Hurtado, A. H. L. M. F. (2010). *Seaweeds and their Role in Globally Changing Environments* (J. Seckbach, R. Einav, & A. Israel, Eds.; Vol. 15). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8569-6>
- Impacto. (2014). *Perfil Do Distrito De Palma Província De Cabo Delgado, 2ª Edição*. <http://www.portaldogoverno.gov.mz>
- Jagtap, A. S., & Meena, S. N. (2021). Seaweed farming: A perspective of sustainable agriculture and socio-economic development. In *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (pp. 493–501). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00022-3>
- James G, Witten D, Hastie TJ, & Tibshirani R. (2013). An introduction to statistical learning: with applications in R. *Springer*.

- Kasim, M., Balubi, A. M., Astuti, O., Rahman, A., Patadjai, R. S., Muskita, W., Takwir, A., Ruslaini, Bahtiar, & Jalil, W. (2021). Comparison between the growth of *Kappahycus alvarezii* (Rhodophyta) seed from tissue culture and clone selection cultivated using horizontal net. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 47(2), 179–184. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.01.003>
- Kavale, M. G., Yadav, A., & Mantri, V. A. (2021). Initial comparison between monoline and tube net method of farming in red agarophyte *Gracilaria dura*: Evidence from hydrodynamic CFD simulations. *Aquaculture*, 536. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736485>
- Kimathi, A. G., Wakibia, J. G., & Gichua, M. K. (2018). Growth rates of *Eucheuma denticulatum* and *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta; Gigartinales) cultured using modified off-bottom and floating raft techniques on the Kenyan coast. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 17(2), 11. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v17i2.2>
- Kregting, L., Blight, A. J., Elsässer, B., & Savidge, G. (2016). The influence of water motion on the growth rate of the kelp *Laminaria digitata*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 478, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.02.006>
- Kregting, L., Healey, E., Crowe, M., & Cunningham, E. M. (2023). Water motion as a conditioning mechanism to improve the yield of the sugar kelp *Saccharina latissima* (Phaeophyceae). *Algal Research*, 74, 103202. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103202>
- Kusuma, N. P. D., Amalo, P., Serihollo, L. G. G., & Pratiwi, R. (2022). *Effect of liquid organic fertilizer on growth and carrageenan of Eucheuma denticulatum (Solieriaceae: Rhodophyta)* (Vol. 15). <http://www.bioflux.com.ro/aac1>
- Lalli, C., & Parsons, T. (2004). *Biological Oceanography* (2 Edition).
- Lideman, Nishihara, G. N., Noro, T., & Terada, R. (2013a). Effect of temperature and light on the photosynthesis as measured by chlorophyll fluorescence of cultured *Eucheuma denticulatum* and *Kappaphycus* sp. (Sumba strain) from Indonesia. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 399–406. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9874-5>
- Lideman, Nishihara, G. N., Noro, T., & Terada, R. (2013b). Effect of temperature and light on the photosynthesis as measured by chlorophyll fluorescence of cultured *Eucheuma denticulatum* and *Kappaphycus* sp. (Sumba strain) from Indonesia. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 399–406. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9874-5>
- MacArtain, P., Gill, C. I. R., Brooks, M., Campbell, R., & Rowland, I. R. (2007). Nutritional Value of Edible Seaweeds. *Nutrition Reviews*, 65(12), 535–543. <https://doi.org/10.1301/nr.2007.dec.535-543>
- Magalhaes, J. M., da Silva, J. C. B., & New, A. L. (2014). Internal Solitary Waves System in the Mozambique Channel. In *Remote Sensing of the African Seas* (pp. 263–284). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8008-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8008-7_14)
- Martinez, B., Rey, U., Carlos, J., & Aranda, S. C. (2012). Habitat distribution models for intertidal seaweeds: Responses to climatic and non-climatic drivers. *Article in Journal of Biogeography*. <https://doi.org/10.2307/41687717>
- Melendres, A. R., & Largo, D. B. (2021). Integrated culture of *Eucheuma denticulatum*, *Perna viridis*, and *Crassostrea* sp. in Carcar Bay, Cebu, Philippines. *Aquaculture Reports*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100683>

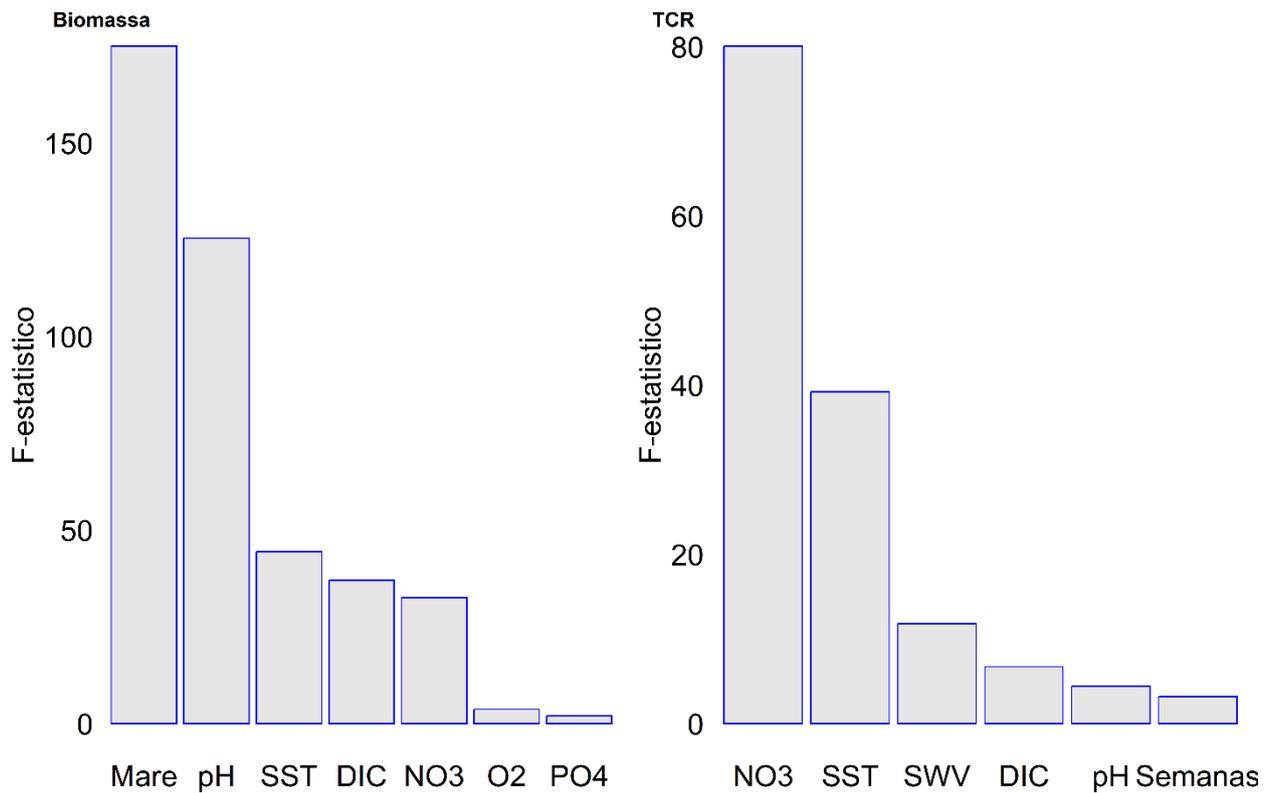
- Miramontes, E., Jouet, G., Thereau, E., Bruno, M., Penven, P., Guerin, C., Le Roy, P., Droz, L., Jorry, S. J., Hernández-Molina, F. J., Thiéblemont, A., Silva Jacinto, R., & Cattaneo, A. (2020). The impact of internal waves on upper continental slopes: insights from the Mozambican margin (southwest Indian Ocean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(6), 1469–1482. <https://doi.org/10.1002/esp.4818>
- Msuya, F. E., Bolton, J., Pascal, F., Narrain, K., Nyonje, B., & Cottier-Cook, E. J. (2022). Seaweed farming in Africa: current status and future potential. *Journal of Applied Phycology*, 34(2), 985–1005. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02676-w>
- Msuya, F. E., Buriyo, A., Omar, I., Pascal, B., Narrain, K., Ravina, J. J. M., Mrabu, E., & Wakibia, J. G. (2014). Cultivation and utilisation of red seaweeds in the Western Indian Ocean (WIO) Region. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 699–705. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0086-4>
- Msuya, F. E., & Hurtado, A. Q. (2017). The role of women in seaweed aquaculture in the Western Indian Ocean and South-East Asia. *European Journal of Phycology*, 52(4), 482–494. <https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1357084>
- Munawan, Kasim, M., & Ruslaini. (2021). Growth rate of *Eucheuma denticulatum* cultivated in horizontal net and vertical net. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 925(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/925/1/012018>
- Narvarte, B. C., Hinaloc, L. A., Gonzaga, S. M., & Roleda, M. (2023). Impacts of aquaculture nutrient sources: ammonium uptake of commercially important eucheumatoids depends on phosphate levels 1. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2914668/v1>
- Narvarte, B. C. V., Genovia, T. G. T., Hinaloc, L. A. R., & Roleda, M. Y. (2022). Growth, nitrate uptake kinetics, and biofiltration potential of eucheumatoids with different thallus morphologies. *Journal of Phycology*, 58(1), 12–21. <https://doi.org/10.1111/jpy.13229>
- Ndobe, S., Yasir, I., Salanggon, A. I. M., Wahyudi, D., Ederyan, Muslihudin, Renol, Adel, Y. S., & Moore, A. M. (2020). Eucheumatoid seaweed farming under global change-tomini bay seaweed trial indicates eucheuma denticulatum (*Spinsum*) could contribute to climate adaptation. *AAFL Bioflux*, 13(5), 2452–2467.
- Ndobe, S., Yasir, I., Salanggon, A.-I. M., Wahyudi, D., Adel, Y. S., & Moore, A. M. (2020). Eucheumatoid seaweed farming under global change-Tomini Bay seaweed trial indicates *Eucheuma denticulatum* (*spinsum*) could contribute to climate adaptation (Vol. 13). <http://www.bioflux.com.ro/aafl>
- Noé, M. (2023). Método de Rede tubular [Foto].
- Pierce, D. (2023). Package “ncdf4” Title Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. <http://dwpierce.com/software>
- Projecto, M. P. A. C. D. A. A. (2012). *Perfil Ambiental E Mapeamento Do Uso Actual Da Terra Nos Distritos Da Zona Costeira De Moçambique*.
- Puspita, M., Setyawidati, N. A. R., & Pangestuti, R. (2020). Hydrocolloid Production of Indonesian Seaweeds. In *Encyclopedia of Marine Biotechnology* (pp. 407–416). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch12>

- Roleda, M. Y., & Hurd, C. L. (2019). Seaweed nutrient physiology: application of concepts to aquaculture and bioremediation. *Phycologia*, 58(5), 552–562. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1622920>
- Roleda, M. Y., Morris, J. N., McGraw, C. M., & Hurd, C. L. (2012). Ocean acidification and seaweed reproduction: increased  $\text{CO}_2$  ameliorates the negative effect of lowered pH on meiospore germination in the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Laminariales, Phaeophyceae). *Global Change Biology*, 18(3), 854–864. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02594.x>
- Román, M., Román, S., Vázquez, E., Troncoso, J., & Olabarria, C. (2020). Heatwaves during low tide are critical for the physiological performance of intertidal macroalgae under global warming scenarios. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78526-5>
- Sarker, S., Akter, M., Rahman, M. S., Islam, M. M., Hasan, O., Kabir, M. A., & Rahman, M. M. (2021). Spatial prediction of seaweed habitat for mariculture in the coastal area of Bangladesh using a Generalized Additive Model. *Algal Research*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102490>
- Sarmiento J., & Gruber N. (2007). Ocean Biogeochemical Dynamics. *Geological Magazine*, 144(6), 1034–1034. <https://doi.org/10.1017/S0016756807003755>
- Sete, C. (2010). *Tidal Structures and Mixing Along the Mozambique Coast*. <https://www.researchgate.net/publication/325146569>
- Simon Wood. (2006). *Generalized Additive Models, An Introduction with R* (Taylor & Francis, Ed.).
- Tasnim, R., Sarker, S., Chamily, F. A., Mohiuddin, M., Ferdous, A., Haque, A. B. M. M., Nahiduzzaman, M., Wahab, M. A., Rahman, M. M., & Asaduzzaman, M. (2024). Site suitability mapping for different seaweed cultivation systems along the coastal and marine waters of Bangladesh: A Generalized Additive Modelling approach for prediction. *Algal Research*, 78, 103404. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2024.103404>
- Taylor, D. I., & Schiel, D. R. (2010). Algal populations controlled by fish herbivory across a wave exposure gradient on southern temperate shores. *Ecology*, 91(1), 201–211. <https://doi.org/10.1890/08-1512.1>
- Tullberg, R. M., Nguyen, H. P., & Wang, C. M. (2022). Review of the Status and Developments in Seaweed Farming Infrastructure. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 10, Issue 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jmse10101447>
- Ucedo, R. (2019). *Uso Do Efluente De Bioflocos Na Manutenção Da Macroalga Kappaphycus alvarezii Em Laboratório E Florianópolis*. 70.
- Ullgren, J. E., van Aken, H. M., Ridderinkhof, H., & de Ruijter, W. P. M. (2012). The hydrography of the Mozambique Channel from six years of continuous temperature, salinity, and velocity observations. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 69, 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.07.003>
- Barreto, R. K. (2016). *Influência De Variáveis Ambientais Na Pesca E Na Ocorrência De Camarões Penaeidae (Rafinesque, 1815) No Litoral Do Estado Do Rio Grande Do Norte Natal/Rn*. (N.D.).

- van Son, T. C., Nikolioudakis, N., Steen, H., Albretsen, J., Furevik, B. R., Elvenes, S., Moy, F., & Norderhaug, K. M. (2020). Achieving Reliable Estimates of the Spatial Distribution of Kelp Biomass. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00107>
- Warren, D. L., Glor, R. E., & Turelli, M. (2008). Environmental niche equivalency versus conservatism: Quantitative approaches to niche evolution. *Evolution*, 62(11), 2868–2883. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2008.00482.x>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wu, J., Jenkins, J. N., & McCarty, J. C. (2023). An Adaptive Sequential Replacement Method for Variable Selection in Linear Regression Analysis. *Open Journal of Statistics*, 13(05), 746–760. <https://doi.org/10.4236/ojs.2023.135036>
- Yahya, B., Yahya, S., Mmochi, A., & Jiddawi, N. (2020a). Comparison of Seaweed Growth, Fish Abundance and Diversity in Deep Water Floating Raft with Tubular Nets and Shallow Water Off-bottom lines Seaweed Farms. *Tanzania Journal of Science*, 46(3), 840–850. <https://doi.org/10.4314/tjs.v46i3.23>
- Zhang, J. (2016). Package “spaa” Type Package Title SPecies Association Analysis.
- Zou, D. (2005). Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on growth, photosynthesis and nitrogen metabolism in the economic brown seaweed, *Hizikia fusiforme* (Sargassaceae, Phaeophyta). *Aquaculture*, 250(3–4), 726–735. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.05.014>
- Zuur, A., Ieno, E., & Elphick, C. (2010). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>

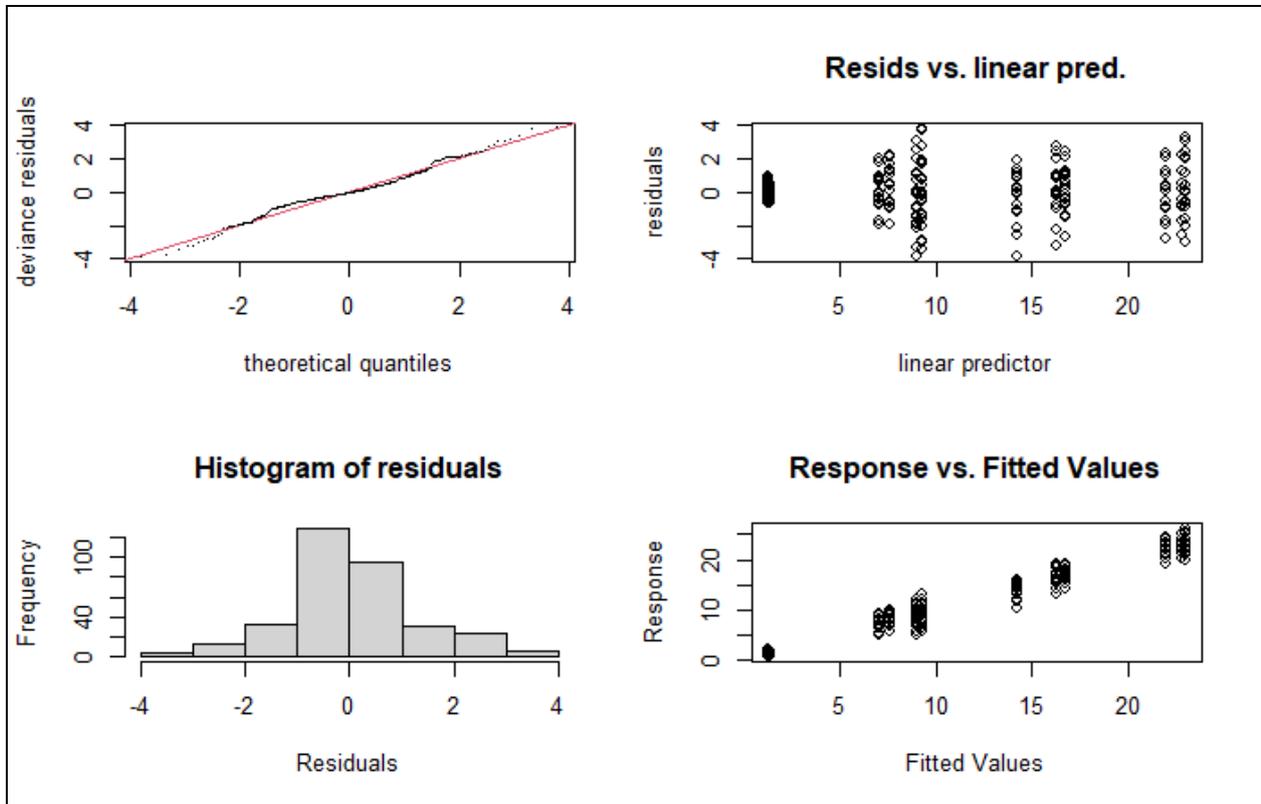
## 10. Anexos – Material Suplementar (S)

## Anexo 1



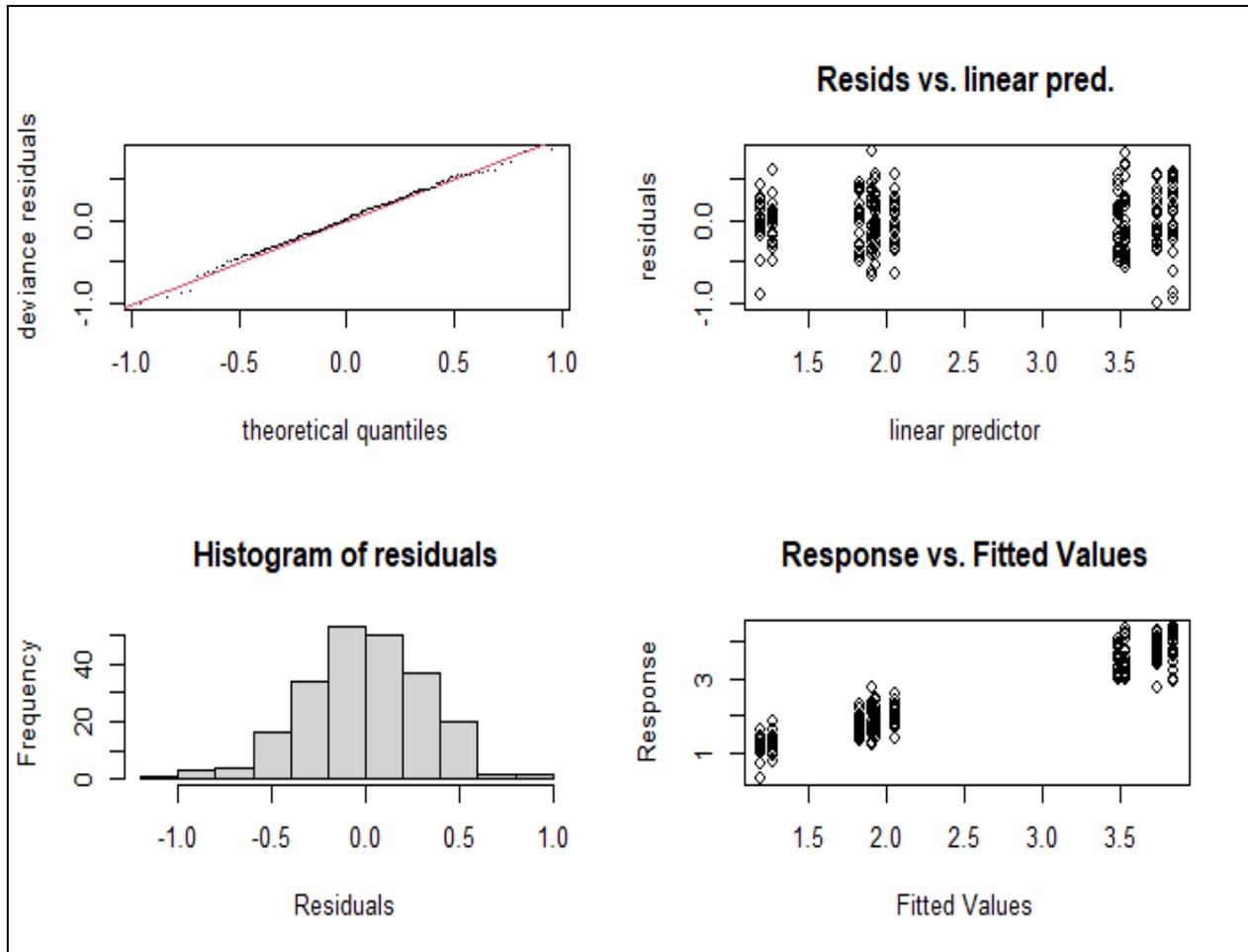
**Figura S1** –Influencia das variáveis explicativas por ordem decrescente de importância relativa em relação a acumulação da biomassa (painel a esquerda) e taxa de crescimento relativo (painel a direita). Mare- altura da maré baixa no mar, SST- Temperatura superficial da água do mar, O2- Oxigênio dissolvido na coluna de água, pH- potencial hidrogeniônico , NO3- nitrato dissolvido na coluna de água, PO4 – fosfato dissolvido na coluna de água, DIC- carbono inorgânico dissolvido na coluna de água, swv - energia da onda, semanas- indica o tempo de cultivo.

## Anexo 2



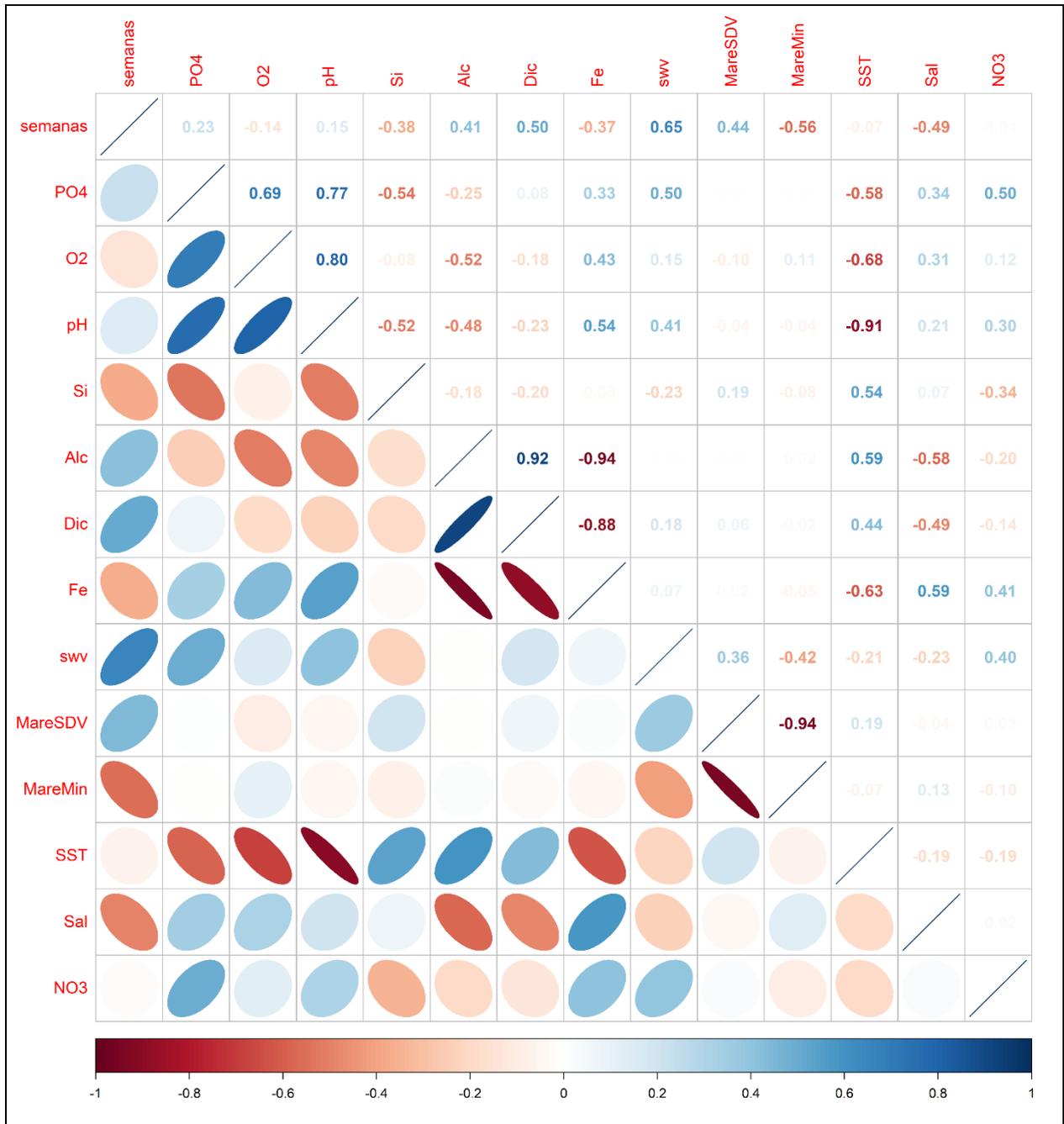
**Figura 2S.** Bondade de adequação do ajuste do GAM para acumulação da biomassa da espécie *E.denticulatum* na região norte de Moçambique. O painel superior esquerdo representa o esboço da homogeneidade da variância. Os painéis superiores à direita e inferior a esquerda, isto é, gráfico linear predictor vs residual e o histograma mostram resíduos próximos à distribuição normal. O painel inferior a direita ilustra a tendência da relação linear entre os valores ajustados pelo modelo e observados

### Anexo 3



**Figura 3S** - Bondade de adequação do ajuste do GAM para taxa de crescimento relativa (TCR) da espécie *E. denticulatum* na região norte de Moçambique. O painel superior esquerdo representa o esboço da homogeneidade da variância. Os painéis superiores à direita e inferior a esquerda, isto é, gráfico linear predictor vs residual e o histograma mostram resíduos próximos à distribuição normal. O painel inferior a direita ilustra a tendência da relação linear entre os valores ajustados pelo modelo e observados

## Anexo 4



**Figura 4S** – Correlação de Pearson entre as variáveis predictoras usadas para selecionar o Modelo que explica o ganho do peso e a taxa de crescimento da macroalga *E.denticulatum*, MareMin- altura mínima da maré, SST- Temperatura superficial da água do mar, O2- Oxigénio dissolvido na coluna de água, pH- potencial hidrogeniónico , NO3- nitrato dissolvido na coluna de água, PO4 – fosfato dissolvido na coluna de água, DIC- carbono inorgânico dissolvido na coluna de água, swv - energia da onda, semanas- indica o tempo de cultivo.