

DM

**Comunidades de microfitoplâncton no  
Arquipélago dos Açores**  
Possíveis influências das ilhas na sua distribuição

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Élia Maria Basílio Rodrigues**

MESTRADO EM BIOLOGIA APLICADA



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

setembro | 2025

**Comunidades de microfitoplâncton no  
Arquipélago dos Açores**  
Possíveis influências das ilhas na sua distribuição  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Élia Maria Basílio Rodrigues**  
MESTRADO EM BIOLOGIA APLICADA

ORIENTAÇÃO  
Manfred Josef Kaufmann

*Comunidades de microfitoplâncton no Arquipélago dos Açores – possíveis influências das ilhas na sua distribuição*



*Tripos sp.*

Élia Maria Basílio Rodrigues

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Biologia Aplicada

Orientador:

Professor Doutor Manfred Josef Kaufmann



## Agradecimentos

A elaboração desta dissertação contou com o contributo, por vezes pontual e discreto, outras vezes mais prolongado e constante, de várias pessoas, cuja presença e apoio foram determinantes para a serenidade, a determinação e a concentração necessárias à sua concretização. A todas elas deixo aqui os meus agradecimentos, de forma genérica.

Ao Professor Doutor Manfred Josef Kaufmann, expresso o meu apreço e consideração pela sua concordância em ser o meu orientador na realização desta dissertação. O seu vasto conhecimento e a sua disponibilidade foram cruciais em todas as etapas deste processo, desde a investigação ao tratamento dos dados, até à redação final da tese.

À minha família, um agradecimento especial pela compreensão demonstrada perante as minhas ausências e pelo seu apoio constante ao longo de todo o percurso efetuado, cujo desfecho se traduz nesta dissertação que aqui se apresenta.



## Resumo

O presente estudo teve como objetivo caracterizar as comunidades de microfitoplâncton no Arquipélago dos Açores e avaliar possíveis influências das ilhas na sua distribuição, composição e biomassa de carbono. Foram analisadas 31 amostras recolhidas durante a expedição M150 *BIODIAZ* de 2018, distribuídas pelas ilhas das Flores, Terceira e Santa Maria, e pelos montes submarinos Banco Princesa Alice e Banco das Formigas. Estas foram obtidas à profundidade da máxima concentração de clorofila (DCM) e analisadas em termos de abundância, biomassa de carbono, composição taxonómica e índices ecológicos, em articulação com os parâmetros físico-químicos da temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido, nutrientes, profundidade média da camada de mistura (MLD) e intensidade do vento. As análises estatísticas revelaram uma elevada variabilidade espacial, com diferenças significativas entre as ilhas e montes submarinos, rejeitando-se a hipótese nula de ausência de influência das ilhas. Santa Maria destacou-se com os maiores valores médios de biomassa de carbono, seguida da Terceira e do Banco das Formigas. Este evidenciou-se em relação ao Banco Princesa Alice, demonstrando haver um efeito de monte submarino. As análises multivariadas e as regressões lineares entre biomassa e variáveis ambientais (como temperatura, oxigénio e MLD) reforçaram o papel dos gradientes físico-químicos locais. Foi detetado um padrão espacial de aumento da biomassa ao longo de um gradiente oeste-leste, com maior biomassa nas ilhas central e oriental do arquipélago. Pelo contrário, não se observaram diferenças significativas entre locais próximos e afastados da costa, não sendo rejeitada a segunda hipótese nula. A tempestade tropical Helene, ocorrida durante a campanha oceanográfica, poderá ter contribuído para a intensificação de processos de mesoescala, como o *upwelling* e a retenção localizada de biomassa. Estes resultados reforçam o papel de processos físicos locais, como o efeito da massa insular (*Island Mass Effect*), na modulação da produtividade e estrutura do microfitoplâncton em sistemas marinhos oligotróficos.

**Palavras-chave:** microfitoplâncton; biomassa de carbono; Arquipélago dos Açores; *Island Mass Effect*; montes submarinos; mesoescala.

## Abstract

The present study aimed to characterize microphytoplankton communities in the Azores Archipelago and to assess possible influences of the islands on their distribution, composition, and carbon biomass. A total of 31 samples collected during the 2018 M150 BIODIAZ expedition were analysed, distributed across the islands of Flores, Terceira, and Santa Maria, as well as the submarine banks Princesa Alice Bank and Formigas Bank. These samples were obtained at the depth of maximum chlorophyll concentration (DCM) and analysed in terms of abundance, carbon biomass, taxonomic composition, and ecological indices, in conjunction with physicochemical parameters, namely temperature, salinity, dissolved oxygen, nutrients, mean mixed layer depth (MLD), and wind intensity. Statistical analyses revealed high spatial variability, with significant differences between islands and submarine banks, leading to the rejection of the null hypothesis of no island influence. Santa Maria stood out with the highest mean carbon biomass values, followed by Terceira and Formigas Bank. The latter was more pronounced in comparison with Princesa Alice Bank, demonstrating the presence of a seamount effect. Multivariate analyses and linear regressions between biomass and environmental variables, such as temperature, oxygen, and MLD, reinforced the role of local physicochemical gradients. A spatial pattern of increasing biomass from west to east was detected, with higher biomass in the central and eastern islands of the archipelago. In contrast, no significant differences were observed between sites located close to and far from the coast, and the second null hypothesis was not rejected. Tropical storm Helene, which occurred during the oceanographic campaign, may have contributed to the intensification of mesoscale processes, such as upwelling and localized biomass retention. These results reinforce the role of local physical processes, such as the Island Mass Effect, in modulating microphytoplankton productivity and structure in oligotrophic marine systems.

**Key words:** microphytoplankton; carbon biomass; Azores Archipelago; Island Mass Effect; seamounts; mesoscale.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>I</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Índice</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>XV</b>
<b>I. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>1</b>
<b>I.1. Microfitoplâncton</b> .....	<b>6</b>
I.1.1. Diatomáceas .....	7
I.1.2. Dinoflagelados .....	8
<b>I.2. Parâmetros físico-químicos</b> .....	<b>9</b>
<b>I.3. Caracterização oceanográfica - Circulação global e massas de água no Arquipélago dos Açores</b> .....	<b>11</b>
<b>I.4. Biomassa de carbono nos organismos microfitoplanctónicos</b> .....	<b>13</b>
<b>I.5. Produtividade na região oceânica do Arquipélago dos Açores</b> .....	<b>14</b>
<b>II. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
<b>II.1. Área de Estudo</b> .....	<b>16</b>
<b>II.2. Colheita de dados e das amostras</b> .....	<b>16</b>
<b>II.3. Parâmetros físico-químicos</b> .....	<b>18</b>
<b>II.4. Análise qualitativa e quantitativa de microfitoplâncton</b> .....	<b>20</b>
<b>II.5. Tratamento e análise estatística dos dados</b> .....	<b>25</b>
II.5.1. Estatística descritiva e análise de normalidade.....	26
II.5.2. Tratamento de dados físico-químicos.....	27
II.5.3. Análises multivariadas .....	27
II.5.4. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na comunidade microfitoplanctónica .....	30
II.5.5. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na biomassa de carbono .....	30
II.5.6. Avaliação da influência da distância à costa na comunidade microfitoplanctónica .....	31
II.5.7. Avaliação da influência da distância à costa na biomassa de carbono.....	32
II.5.8. Relações entre a abundância, a biomassa de carbono e os parâmetros físico-químicos .....	33

<b>III. RESULTADOS</b> -----	<b>34</b>
<i>III.1. Caracterização dos parâmetros físico-químicos por ilha/monte submarino e por distância à costa</i> -----	<b>34</b>
<i>III.2. Abundância, composição da comunidade microfitoplanctónica e biomassa de carbono presente nas amostras</i> -----	<b>41</b>
<i>III.3. Abundância, composição da comunidade microfitoplanctónica e biomassa de carbono nas ilhas e montes submarinos</i> -----	<b>48</b>
III.3.1. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na composição microfitoplanctónica-----	51
III.3.1.1. Índices de diversidade nas ilhas e montes submarinos-----	57
III.3.2. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na biomassa de carbono-----	59
<i>III.4. Abundância, composição da comunidade microfitoplanctónica e biomassa de carbono pela distância à costa</i> -----	<b>61</b>
III.4.1. Avaliação da influência da distância à costa na composição microfitoplanctónica-----	64
III.4.1.1. Índices de diversidade por distância à costa-----	66
III.4.2. Avaliação da influência da distância à costa na biomassa de carbono-----	68
<i>III.5. Relações entre a abundância, a biomassa de carbono e parâmetros físico-químicos</i> -----	<b>68</b>
III.5.1. Ilhas e montes submarinos e parâmetros físico-químicos-----	73
III.5.2. Distância à costa e parâmetros físico-químicos-----	79
<b>IV. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> -----	<b>86</b>
<i>IV.1. Colheita de amostras e análise do microfitoplâncton</i> -----	<b>86</b>
<i>IV.2. Estrutura e biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas e parâmetros físico-químicos</i> -----	<b>87</b>
<i>IV.3. Estrutura e biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas e parâmetros físico-químicos nas ilhas e montes submarinos</i> -----	<b>91</b>
<i>IV.4. Estrutura e biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas e parâmetros físico-químicos por distância à costa</i> -----	<b>103</b>
<b>V. CONCLUSÕES</b> -----	<b>108</b>
<b>VI. REFERÊNCIAS</b> -----	<b>111</b>
<b>VII. ANEXOS</b> -----	<b>137</b>



## Índice de Figuras

- Figura I-1:** Circulação superficial no Atlântico Norte, evidenciando o Giro Subtropical do Atlântico Norte e a região do Arquipélago dos Açores. O fundo representa a magnitude média da velocidade das correntes superficiais. As setas indicam o sentido dominante da circulação média de larga escala, destacando a continuidade dinâmica entre a Corrente do Golfo, a Corrente do Atlântico Norte e a Corrente dos Açores, bem como o ramo oriental associado à Corrente de Canárias e o fecho meridional do giro através da Corrente Equatorial Norte. Figura adaptada de Sala *et al.* (2016). ..... 12
- Figura II-1:** Localização do Arquipélago dos Açores no Atlântico Norte (Fonte: Gonçalves *et al.*, 2015) e localização das 31 estações de amostragem distribuídas pelas ilhas das Flores, da Terceira e de Santa Maria e pelos montes submarinos Banco Princesa Alice e Banco das Formigas, no Arquipélago dos Açores, onde foram recolhidas amostras discretas de água para análise da comunidade microfítotoplanctónica. .... 17
- Figura II-2:** Microscópio invertido *DMI8, Leica Microsystems* (Fonte: Manfred Kaufmann). ..... 21
- Figura II-3:** Câmara de sedimentação utilizada nas análises antes da observação microscópica. **(A)** Sedimentação de uma amostra numa câmara de sedimentação de 50 mL e duas caixas de Petri com água. **(B)** Câmara de sedimentação e caixas de Petri cobertas para manter a humidade durante a sedimentação de, pelo menos, 24 horas. .... 21
- Figura II-4:** Distribuição das distâncias das estações em relação às ilhas e montes submarinos. O histograma representa a frequência das distâncias (em km) das estações ao ponto de referência, enquanto a linha vermelha indica a densidade estimada dos dados. A linha vermelha tracejada assinala a mediana da distância (6.8 km), utilizada para categorizar as estações amostradas em "Próximo" ( $\leq 6.8$  km) e "Afastado" ( $> 6.8$  km). ..... 32
- Figura III-1:** Perfil de fluorescência de clorofila *a* em função da pressão (*dbar*) para todas as estações em estudo. A fluorescência foi medida com um sensor WET LABS, modelo ECO-FL-NTU, com uma sensibilidade de  $0.025 \text{ mg m}^{-3}$ . Cada ponto preto representa uma medição individual de fluorescência. A linha vermelha corresponde à média suavizada dos valores ao longo da coluna de água. A linha tracejada verde assinala a profundidade média (~65 m) onde se registaram os valores máximos de fluorescência, indicando a presença de uma camada subsuperficial rica em clorofila *a*. ..... 34
- Figura III-2:** Distribuição dos parâmetros físico-químicos e de nutrientes por ilha e monte submarino. Os *boxplots* representam a variação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidade (unidade prática de salinidade, PSU), oxigénio dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ ), profundidade da camada de mistura (MLD, m) e velocidade média do vento (m/s), e as concentrações de nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\mu\text{M}$ ) e silicato ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\mu\text{M}$ ) nas localidades de Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas. A linha preta central representa a mediana; as extremidades da caixa correspondem ao primeiro e terceiro quartis. Os pontos vermelhos representam a média aritmética. Pontos isolados fora das caixas indicam valores extremos (*outliers*). Foi identificada diferença estatisticamente significativa entre regiões apenas para o parâmetro da salinidade ( $p = 0.00255$ ), sinalizada no respetivo gráfico com dois asteriscos. .... 37
- Figura III-3:** Distribuição dos parâmetros físico-químicos e nutrientes por categorias de distância ("Próximo" e "Afastado"). Os *boxplots* representam os valores de temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidade prática (PSU), oxigénio dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ ), nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) e silicato ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) (todos em  $\mu\text{M}$ ), velocidade média do vento (m/s) e profundidade da camada de mistura (MLD, em metros), medidos nas 31 estações amostradas. Em cada gráfico, a mediana é representada pela linha horizontal dentro da caixa, os limites da caixa correspondem ao intervalo interquartil (25. $^{\circ}$ –75. $^{\circ}$  percentil), os extremos (bigodes) indicam a variação excluindo valores atípicos, e o ponto vermelho assinala a média. Pontos isolados fora das caixas indicam valores extremos (*outliers*). A presença de diferenças estatisticamente significativas entre as categorias de distância é assinalada com asteriscos, acompanhados do respetivo valor de  $p$ . 40
- Figura III-4:** Abundância de células microfítotoplanctónicas por estação. As barras representam o número total de células por litro (cél.  $\text{L}^{-1}$ ) em cada estação amostrada, com a indicação da profundidade sobre cada barra. As estações estão agrupadas por ilha ou monte (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas) localizados na província biogeoquímica do Giro Subtropical do

Atlântico Norte Oriental (NAST). A linha tracejada vermelha indica a média total de abundância (15 487 cél. L<sup>-1</sup>)..... 42

**Figura III-5:** *Boxplot* que representa a distribuição da abundância (células L<sup>-1</sup>) dos grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) no conjunto das estações amostradas. A linha horizontal no interior de cada caixa corresponde à mediana. Os limites da caixa indicam o primeiro e o terceiro quartis, enquanto os bigodes se estendem até 1.5 vezes o intervalo interquartil. Pontos isolados fora dos bigodes representam valores atípicos (*outliers*). A média de cada grupo encontra-se assinalada por um ponto vermelho..... 43

**Figura III-6:** Abundância média de diatomáceas e dinoflagelados por estação de amostragem. As barras representam a abundância média (cél. L<sup>-1</sup>) dos dois principais grupos de microfitoplâncton — diatomáceas (a verde) e dinoflagelados (a laranja) — em cada estação amostrada. As estações estão organizadas segundo a ilha ou monte submarino a que pertencem (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas)..... 43

**Figura III-7:** Abundância média total de microfitoplâncton por estação de amostragem (cél. L<sup>-1</sup>), discriminada por ordem taxonómica. As barras representam a abundância média de cada ordem em cada estação, permitindo visualizar a composição relativa dos principais grupos. Estão incluídas as ordens dominantes de diatomáceas, dinoflagelados e categorias não identificadas (NI). A linha tracejada vermelha indica a média global da abundância média total por estação (≈ 15 800 cél. L<sup>-1</sup>), facilitando a identificação das estações com valores acima ou abaixo deste valor de referência..... 44

**Figura III-8:** Biomassa de carbono por estação e profundidade. As barras representam a biomassa de carbono (µg C L<sup>-1</sup>) do microfitoplâncton em cada estação amostrada, com indicação da profundidade sobre cada barra. As estações estão organizadas segundo a ilha ou monte a que pertencem. A linha tracejada vermelha indica a média global da biomassa (10.41 µg C L<sup>-1</sup>), permitindo comparar os valores entre as diferentes estações e profundidades. .... 45

**Figura III-9:** *Boxplot* da biomassa (µg C L<sup>-1</sup>) dos dois principais grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) no conjunto das estações amostradas. A linha horizontal no interior de cada caixa representa a mediana, enquanto os limites superior e inferior da caixa correspondem ao terceiro e ao primeiro quartil, respetivamente. Os bigodes estendem-se até 1.5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos acima representam valores atípicos. A média de cada grupo está assinalada com um ponto vermelho. Observa-se que, no caso das diatomáceas, a média encontra-se acima do terceiro quartil, refletindo a influência de valores extremos elevados e uma distribuição assimétrica positiva..... 46

**Figura III-10:** Biomassa média de carbono de diatomáceas e dinoflagelados por estação. As barras representam os valores médios de biomassa de carbono (µg C L<sup>-1</sup>) dos dois principais grupos de microfitoplâncton — diatomáceas (a verde) e dinoflagelados (a laranja) — em cada estação amostrada. As estações estão organizadas de acordo com a ilha ou monte a que pertencem (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas). .... 46

**Figura III-11:** Biomassa média de carbono por ordem de microfitoplâncton, por estação. As barras empilhadas representam a biomassa média de carbono (µg C L<sup>-1</sup>) das 15 categorias taxonómicas de microfitoplâncton identificadas, ao nível da ordem, em cada estação que contribuem com maior biomassa média. As estações estão organizadas de acordo com a ilha ou monte a que pertencem (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas). Cada cor representa uma ordem distinta, permitindo visualizar a contribuição relativa de cada grupo para a biomassa total..... 47

**Figura III-12:** Abundância microfitoplanctónica por ilha/monte. O gráfico representa a distribuição da abundância de microfitoplâncton (cél. L<sup>-1</sup>) nas diferentes ilhas e montes da província biogeoquímica do Giro Subtropical do Atlântico Norte Oriental (NAST). As caixas mostram os valores interquartis (Q1–Q3), a linha horizontal marca a mediana e os pontos pretos representam as médias..... 48

**Figura III-13:** Abundância média de diatomáceas e dinoflagelados por ilha/monte. As barras representam os valores médios de abundância celular (cél. L<sup>-1</sup>) dos dois principais grupos de microfitoplâncton — diatomáceas (a verde) e dinoflagelados (a laranja) — para cada local amostrado (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas). .... 49

- Figura III-14:** Distribuição da biomassa microfitoplanctónica ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) nas diferentes ilhas e montes submarinos. Os *boxplots* representam os valores mínimo, máximo, quartis e mediana da biomassa total, enquanto os pontos pretos indicam a média. .... 50
- Figura III-15:** Biomassa média de carbono dos dois grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) por ilha e monte submarino dos Açores. .... 51
- Figura III-16:** Análise de Coordenadas Principais (PCoA) baseada na dissimilaridade de *Bray-Curtis* da composição taxonómica do microfitoplâncton, ao nível da ordem. Cada ponto representa a composição média das comunidades microfitoplanctónicas de uma ilha ou monte submarino, com cores distintas para cada local amostrado. .... 52
- Figura III-17:** Análise de Coordenadas Principais (PCoA) baseada na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis* da composição taxonómica da comunidade microfitoplanctónica ao nível da ordem, considerando as abundâncias por amostra. Cada ponto representa uma amostra individual, com cores distintas associadas às diferentes ilhas e montes submarinos. .... 53
- Figura III-18:** Representação gráfica do teste de dispersão multivariada (PERMDISP), com base na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis*, utilizando uma Análise de Coordenadas Principais (PCoA). Cada ponto representa uma amostra individual, ligada ao centróide do respetivo grupo (ilha ou monte submarino). As linhas delimitam a variabilidade interna de cada grupo, evidenciando a dispersão das amostras. .... 57
- Figura III-19:** *Boxplots* dos valores individuais dos índices ecológicos por estação para cada ilha ou monte submarino: **(à esquerda)** índice de diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), **(ao meio)** riqueza específica ( $S$ ) e **(à direita)** equidade de *Pielou* ( $J'$ ). As caixas representam o intervalo interquartil (25.º a 75.º percentil), com a mediana indicada pela linha horizontal e a média assinalada por um ponto preto. Os dados foram agrupados por ilha/monte e organizados segundo a ordem geográfica: Flores, Princesa Alice, Terceira, Santa Maria e Formigas. .... 59
- Figura III-20:** A distribuição da abundância do microfitoplâncton foi representada por categorias de distância ("Próximo", a verde e "Afastado", a laranja), definidas a partir da mediana dos valores obtidos entre as estações amostradas. Em cada categoria, a abundância foi apresentada sob a forma de *boxplots*, onde é visível a dispersão dos dados (com os valores extremos ocultados para maior legibilidade). Foi assinalada a média da abundância através de um ponto branco central, permitindo comparar visualmente a tendência central entre as duas categorias. .... 61
- Figura III-21:** Abundância média de microfitoplâncton por grupo taxonómico (diatomáceas e dinoflagelados) e por categoria de distância em relação à costa. As categorias de distância foram definidas com base na mediana dos valores registados entre as estações amostradas, sendo classificadas como "Próximo" (verde) e "Afastado" (laranja). .... 62
- Figura III-22:** Distribuição da biomassa de carbono em função da distância à costa, categorizada como "Próximo" e "Afastado", com base na mediana das distâncias. O *boxplot* apresenta a mediana (linha horizontal dentro da caixa), o intervalo interquartil (caixa) e os valores extremos (bigodes). A média é assinalada pelo símbolo branco. .... 63
- Figura III-23:** Biomassa média de carbono (proporção relativa) dos principais grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) em duas categorias de distância em relação à linha de costa, definidas com base na mediana (6.8 km). As barras representam a contribuição média de cada grupo para a biomassa total nas amostras recolhidas a menos de 6.8 km (verde) e a mais de 6.8 km (laranja) da costa. .... 64
- Figura III-24:** Representação gráfica da Análise de Coordenadas Principais (PCoA), baseada na distância de *Bray-Curtis*, considerando as abundâncias das ordens microfitoplanctónicas de amostras individuais. Cada ponto representa uma amostra, classificada como "Próximo" ou "Afastado", de acordo com a sua proximidade à costa ou ponto de referência. A disposição dos pontos no espaço bidimensional reflete o grau de similaridade na composição microfitoplanctónica entre os grupos, permitindo avaliar padrões estruturais na comunidade. . 65
- Figura III-25:** *Boxplots* dos valores individuais dos índices ecológicos do microfitoplâncton por categoria de distância em relação à costa. Os gráficos representam, da esquerda para a direita, o índice de diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), a riqueza específica ( $S$ ) e a equidade de *Pielou* ( $J'$ ), respetivamente. As caixas indicam a dispersão dos dados por categoria ("Próximo" e "Afastado"), os traços horizontais representam as medianas e os pontos brancos correspondem às médias.

As cores correspondem às categorias de distância: verde para “Próximo” e laranja para “Afastado” ..... 68

**Figura III-26:** Coeficientes de correlação de *Spearman* entre as variáveis ambientais e as variáveis biológicas (biomassa de carbono e abundância de microfitoplâncton). As barras representam a força e direção da correlação, sendo os valores positivos indicativos de correlação positiva e os negativos de correlação negativa. As cores distinguem as variáveis biológicas: laranja para a abundância e roxo para a biomassa. .... 70

**Figura III-27:** Mapa de correlação de *Spearman* entre as variáveis ambientais e as variáveis biológicas (biomassa de carbono e abundância de microfitoplâncton). O gradiente de cores representa a direção e intensidade da correlação (vermelho = positiva; azul = negativa), sendo os valores numéricos os coeficientes de *Spearman* ( $r$ ). As correlações foram consideradas significativas com base nos valores de  $p$  (cf. Tabela E-I, Anexo E e a força das correlações foi interpretada segundo Dancey & Reidy (2007): muito fraca ( $|r| < 0.10$ ), fraca ( $0.10 \leq |r| < 0.30$ ), moderada ( $0.30 \leq |r| < 0.50$ ), forte ( $0.50 \leq |r| < 0.70$ ) e muito forte ( $|r| \geq 0.70$ ). .... 71

**Figura III-28:** *Biplot* da Análise de Componentes Principais (PCA), representando as relações entre a biomassa de carbono, a abundância de microfitoplâncton e os parâmetros físico-químicos (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, profundidade, distância à costa, velocidade média do vento, camada de mistura e nutrientes:  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ). As setas indicam a direção e a contribuição de cada variável para os dois primeiros componentes principais ( $\text{Dim1} = 28. \%$  e  $\text{Dim2} = 19.6\%$ ), que explicam 48.2% da variância total dos dados. A orientação e o comprimento das setas refletem a correlação das variáveis com os componentes principais: vetores na mesma direção indicam associação positiva com o mesmo eixo, enquanto vetores em direções opostas indicam correlação negativa. .... 72

**Figura III-29:** *Biplot* da Análise de Componentes Principais (PCA) baseada nas médias das variáveis ambientais por ilha ou monte submarino. Foram consideradas as seguintes: temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, nitrato + nitrito, fosfato, silicato, velocidade média do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). As setas representam as variáveis ambientais, sendo a sua orientação e comprimento indicativos da direção e magnitude da sua contribuição para os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), que explicam 82.2% da variância total dos dados (PC1 = 54.9%; PC2 = 27.3%). Os pontos coloridos e com formas distintas representam as diferentes ilhas e montes submarinos, permitindo visualizar padrões ambientais regionais no espaço multivariado. .... 75

**Figura III-30:** Gráficos de dispersão entre as variáveis ambientais, físico-químicas e biológicas e as diferentes ilhas/montes submarinos. A biomassa e a abundância foram previamente transformadas por logaritmo decimal ( $\log_{10}(x + 1)$ ). Valores ausentes nos nutrientes foram imputados com a média. Para cada variável foi ajustado um modelo de regressão linear simples sobre a sequência ordinal das ilhas, ordenadas geograficamente da mais ocidental para a mais oriental. Estão representadas as linhas de tendência (a preto) e os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e de significância estatística ( $p$ ). .... 77

**Figura III-31:** Dendrograma resultante da análise de clusterização hierárquica dos locais de amostragem (agrupados por ilha ou monte submarino), baseado na composição relativa das ordens de microfitoplâncton, biomassa de carbono e variáveis ambientais. A matriz foi construída com dados padronizados e imputação dos valores ausentes, e a clusterização foi realizada com distância euclidiana e método de ligação *Ward.D2*. As cores representam os agrupamentos ecológicos identificados. .... 79

**Figura III-32:** Representação da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com base nas variáveis ambientais: temperatura; salinidade; oxigênio dissolvido; nitrato + nitrito, fosfato, silicato; velocidade média do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). Os dados foram previamente imputados com o método *imputePCA* e padronizados (*z-score*). Cada ponto representa uma amostra, categorizada como “Próximo” (estações costeiras) ou “Afastado” (estações oceânicas), com base na mediana da distância ao litoral. As setas indicam a contribuição das variáveis para os dois primeiros componentes principais: *Dim1* (28.7%) e *Dim2* (20.1%), que, em conjunto, explicam 48.8% da variância total. .... 81

**Figura III-33:** Gráficos de regressão linear simples entre a distância à costa e as variáveis ambientais e biológicas analisadas. Em cada painel apresenta-se a relação entre a distância e a variável em estudo e a reta de regressão ajustada. São indicados os valores do coeficiente de

determinação ( $R^2$ ) e da significância estatística do modelo ( $p$ -valor). A biomassa e a abundância foram previamente transformadas por logaritmo decimal ( $\log_{10}(x + 1)$ ). As categorias espaciais “Próximo” e “Afastado” encontram-se diferenciadas graficamente. As relações estatisticamente significativas, considerando  $p < 0.05$ , correspondem à temperatura e ao oxigênio dissolvido. . 84

**Figura IV-1:** Distribuição da clorofila *a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) obtida através de um fluorímetro, previamente calibrado, a 65 *dbar* de pressão (~65 m de profundidade), durante a campanha oceanográfica a bordo do navio de investigação *RV METEOR* na região do Arquipélago dos Açores. Os valores mais elevados de fluorescência, interpretados como *proxy* da concentração de clorofila *a*, observam-se nas proximidades das ilhas do grupo central e oriental (Terceira, Santa Maria e Banco das Formigas). ..... 92

**Figura IV-2:** Distribuição horizontal da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) na camada superficial (pressão, ~5 *dbar*) ao longo do arquipélago dos Açores, durante a campanha oceanográfica. Os valores de temperatura foram interpolados espacialmente com base nos dados obtidos *in situ* e representam o padrão térmico regional à escala da província NAST. Observa-se um gradiente térmico evidente de noroeste para sudeste, com temperaturas mais elevadas ( $>25^{\circ}\text{C}$ ) nas regiões ocidentais e valores mais baixos ( $\sim 22.5^{\circ}\text{C}$ ) no setor oriental. As ilhas estão representadas a cinzento. .... 97

**Figura IV-3:** Distribuição horizontal da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 65 metros de profundidade (65 *dbar*), aproximadamente, na região do arquipélago dos Açores, inserida na província oligotrófica do NAST. Os dados foram obtidos durante a campanha oceanográfica e interpolados espacialmente. Observa-se um gradiente térmico do noroeste para sudeste, com temperaturas mais elevadas ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ) em áreas próximas à ilha da Terceira e valores mais baixos ( $<18^{\circ}\text{C}$ ) nas regiões ocidentais. As ilhas estão representadas a cinzento. .... 98

## Índice de Tabelas

- Tabela II-1:** Distribuição das amostras selecionadas pelas diferentes localizações: ilhas (Flores, Terceira e Santa Maria) e montes submarinos (Banco Princesa Alice e Banco das Formigas). 18
- Tabela II-2:** Estações substituídas por outras geograficamente próximas, com indicação da distância entre ambas, relativamente às concentrações dos nutrientes. .... 20
- Tabela II-3:** Estações substituídas por amostras recolhidas a profundidades próximas dentro da mesma estação, relativamente às concentrações dos nutrientes. .... 20
- Tabela III-1:** Estatísticas descritivas da abundância e da biomassa de carbono no total das estações amostradas. Valores médios, desvio padrão, mediana, mínimo, máximo, variância, soma e intervalos de confiança para a abundância (cél. L<sup>-1</sup>) e biomassa de carbono (µg C L<sup>-1</sup>) obtidos na província biogeoquímica do Giro Subtropical do Atlântico Norte Oriental (NAST). .. 41
- Tabela III-2:** Resultados da análise PERMANOVA (*Permutational Multivariate Analysis of Variance*) realizada para testar diferenças na composição taxonómica do microfitoplâncton ao nível da ordem entre ilhas e montes submarinos. A matriz de dissimilaridade foi calculada utilizando a distância de *Bray-Curtis*, com transformação de *Hellinger* aplicada às abundâncias por estação. .... 54
- Tabela III-3:** Resultados da análise PERMANOVA pareada (999 permutações) aplicada à composição taxonómica do microfitoplâncton ao nível da ordem, entre pares de ilhas e montes submarinos. Estão indicados os valores da estatística pseudo-F (*F.Model*) e os respetivos *p*-valores. .... 55
- Tabela III-4:** A tabela apresenta os resultados da análise PERMDISP (*Permutational Analysis of Multivariate Dispersions*), que testa a homogeneidade da variância (dispersão) entre grupos com base em distâncias multivariadas. A coluna "Df" indica os graus de liberdade, enquanto "Soma dos Quadrados" e "Quadrado Médio" representam, respetivamente, a variação total explicada e a sua média por grau de liberdade. A "Estatística F" é usada para testar diferenças de dispersão entre os grupos. O valor-*p* ("Pr(>F)") foi calculado com base em 999 permutações e indica a probabilidade de observar a estatística F sob a hipótese nula de dispersões iguais. .... 56
- Tabela III-5:** Valores médios dos índices ecológicos de diversidade calculados por ilha e monte submarino. O índice de *Shannon* (H') representa a diversidade específica, a riqueza (S) corresponde ao número médio de grupos taxonómicos distintos por estação, e a equidade de *Pielou* (J') expressa a uniformidade na distribuição das abundâncias relativas. Os valores foram obtidos a partir das estações amostradas em cada local, com exclusão apenas das categorias não identificadas sem resolução morfológica (NI-UDiatom, NI-UDino, NI-UPOA e NI-UPOB). A coluna "n" indica o número de estações consideradas por ilha e monte. .... 58
- Tabela III-6:** Comparações par-a-par entre ilhas e montes submarinos para a biomassa de carbono (teste de *Dunn*), com os respetivos valores do teste estatístico Z, *p*-valor não ajustado (*P.unadj*) e *p*-valor ajustado (*P.adj*) utilizando o método de *Holm* para correção de múltiplas comparações. .... 60
- Tabela III-7:** Resultados da análise PERMANOVA aplicada à matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis* para avaliar o efeito da proximidade à costa na composição taxonómica das comunidades microfitoplânctónicas. A variável "Proximidade" (grupos "Próximo" vs. "Afastado") não apresentou efeito estatisticamente significativo (*p* = 0.438), explicando apenas 2.61% da variação observada (*R*<sup>2</sup> = 0.02614). A maior parte da variação (97.39%) foi atribuída ao componente residual. .... 66
- Tabela III-8:** Valores médios dos índices ecológicos do microfitoplâncton por categoria de distância em relação à costa. Apresentam-se os valores médios do índice de diversidade de *Shannon* (H'), da riqueza específica (S) e da equidade de *Pielou* (J'), calculados a partir das estações atribuídas a cada categoria ("Próximo" ou "Afastado"). A coluna "n" indica o número de estações incluídas em cada grupo. .... 67
- Tabela III-9:** Cargas fatoriais (*loadings*) das variáveis ambientais nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA), calculadas com base nas médias por ilha ou monte submarino. Os valores apresentados representam a contribuição relativa de cada variável para a definição dos eixos principais. Cargas mais elevadas, positivas

ou negativas, indicam uma influência mais forte da variável na orientação do respetivo componente..... 74

**Tabela III-10:** Cargas fatoriais (*loadings*) das variáveis ambientais nos dois primeiros componentes principais (*Dim1* e *Dim2*) da Análise de Componentes Principais (PCA). A análise foi realizada com base nas médias das variáveis ambientais: temperatura; salinidade; oxigénio dissolvido; nitrato + nitrito, fosfato, silicato; velocidade média do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). Os dados foram previamente imputados com o método *imputePCA* e padronizados (*z-score*). Os valores apresentados indicam o grau de correlação entre cada variável e os componentes principais. Cargas mais elevadas (positivas ou negativas) indicam maior influência da variável na definição do respetivo eixo. .... 80

**Tabela III-11:** Valores médios das variáveis ambientais nas estações classificadas como “Próximo” (próximas da costa) e “Afastado” (afastadas da costa). As médias foram calculadas com base nas amostras utilizadas na Análise de Componentes Principais (PCA), após imputação dos valores ausentes. .... 82

## Lista de Abreviaturas

**C** - Carbono

**CA** - Corrente dos Açores

**CC** - Corrente das Canárias

**CG** - Corrente do Golfo

**CO<sub>2</sub>** - Dióxido de carbono

**CTD/Rosette** - Condutividade-Temperatura-Profundidade ou *Conductivity-Temperature-Depth*

**DCM** - Zona da máxima profundidade de clorofila ou *Deep Chlorophyll Maximum*

**DQEM** - Diretiva Quadro Estratégia Marinha

**Fe** - Ferro

**H<sub>0</sub>**- Hipótese nula

**HGS** - *Heterocapsa*, *Gymnodinium* e *Scrippsiella*

**HPLC** - Cromatografia Líquida de Alta Eficiência ou *High-Performance Liquid Chromatography*

**IME** - Efeito da Massa Insular ou *Island Mass Effect*

**MLD** - Profundidade média da camada de mistura ou *Mixed Layer Depth*

**N** - Nitrogénio ou azoto

**NA** - Valores ausentes

**NAC** - Corrente do Atlântico Norte ou *North Atlantic Current*

**NAST** - Giro Subtropical do Atlântico Norte ou *North Atlantic Subtropical Gyre*

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>** - Nitrato + Nitrito

**ODV** - *Ocean Data View*

**P** - Fósforo

**PCA** - Análise de Componentes Principais ou *Principal Component Analysis*

**PCoA** - Análise de Coordenadas Principais ou *Principal Coordinates Analysis*

**PERMANOVA** - Análise de Variância Multivariada por Permutação ou *Permutational Multivariate Analysis of Variance*

**PERMDISP** - Teste de Permutação para Homogeneidade das Dispersões Multivariadas ou *Permutation Test for Homogeneity of Multivariate Dispersions*

**PMM** - Correspondência de Média Preditiva ou *Predictive Mean Matching*

**PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>** - Fosfato

**PSU** - Unidade Prática de Salinidade ou *Practical Salinity Unit*

**SAR** - Supergrupo Stramenopiles – Alveolata – Rhizaria

**Si** - Sílica

**Si (OH)<sub>4</sub>** - Silicato (ácido ortossilícico)

**UDiatom** - Diatomácea Não identificada ou *Unidentified Diatom*

**UDino** - Dinoflagelado Não Identificado ou *Unidentified Dinoflagellate*

**UPOA** - Organismo Planctónico Não Identificado (semelhante a dinoflagelado)  
ou *Unidentified Planktonic Organism A*

**UPOB** - Organismo Planctónico Não Identificado (semelhante a diatomácea) ou  
*Unidentified Planktonic Organism B*

**Upwelling** - Afloramento de águas de profundidade ricas em nutrientes.

*Quando penso no mar  
A linha do horizonte é um fio de asas  
E o corpo das águas é luar, [...]*

*Quando penso no mar, o mar regressa  
A certa forma que só teve em mim -  
Que onde ele acaba, o coração começa. [...]*

Vitorino Nemésio, *Correspondência ao Mar* (1938, citado em Duarte, 2018)

## I. Introdução geral

Esta dissertação surge na sequência do projeto de expedição científica M150 *BIODIAZ* de 2018 – *BIODiversity of the AZores* (George *et al.*, 2018) e pretendeu estudar a produtividade das ilhas dos Açores (Flores, Terceira e Santa Maria) e dos montes submarinos Banco Princesa Alice e Banco das Formigas, através dos valores da biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas (diatomáceas e dinoflagelados). Para tal, procedeu-se à análise das amostras de água colhidas durante essa expedição para a identificação taxonómica, quantificação da abundância dos organismos do microfitoplâncton e posterior conversão para biomassa de carbono e, por último, o tratamento estatístico dos dados obtidos.

Sendo o objeto desta dissertação as comunidades microfitoplantónicas do Arquipélago dos Açores interessa, antes de mais, caracterizar de forma sumária, este tipo de organismos marinhos, assim como, fundamentar a importância do seu estudo.

O fitoplâncton diz respeito aos seres unicelulares do oceano que flutuam e realizam a fotossíntese (Verlecar & Desai, 2004) e compreende uma grande diversidade de organismos fotossintéticos e fotoautotróficos com a capacidade de produzir energia química a partir da luz (Nybakken & Bertness, 2005) e que apresentam uma história e ecologia evolucionárias diversas (Pierella Karlusich *et al.*, 2020, 2023). Com ciclos de vida, taxas de renovação, necessidades de nutrientes e luz (Reynolds, 2006), características funcionais, como a distribuição por classes de tamanho (Brotas *et al.*, 2013), bem como estratégias tróficas diversas (Glibert & Mitra, 2022), o fitoplâncton sustém as cadeias alimentares marinhas e os ciclos biogeoquímicos (Falkowski, 2012; Vargas *et al.*, 2015; Xi *et*

*al.*, 2023). Apesar da sua biomassa representar menos de um por cento da biomassa fotossintética do planeta (Bristow *et al.*, 2017), o fitoplâncton é responsável, por cerca, de 50% do oxigénio global (Pierella Karlusich *et al.*, 2023) e pela maior parte da produção primária nos oceanos (Field *et al.*, 1998). A restante, é da responsabilidade de macroalgas, plantas marinhas e organismos quimiossintéticos (Duarte *et al.*, 2005). A matéria orgânica produzida pelo fitoplâncton é consumida por zooplâncton herbívoro que, por sua vez, serve de alimento aos níveis tróficos seguintes (Lombard *et al.*, 2019), servindo de suporte para toda a vida marinha (Davies *et al.*, 2016; Pierella Karlusich *et al.*, 2020). O fitoplâncton é responsável pelo sequestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através da “bomba biológica” de carbono, diminuindo a sua acumulação na atmosfera e contribuindo, assim, para a regulação dos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico e do clima (Brotas *et al.*, 2023; Cermeño *et al.*, 2008; Dutkiewicz *et al.*, 2020; Falkowski *et al.*, 1998; Guidi *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2000). Ao utilizar os recursos necessários para o seu metabolismo e crescimento, o fitoplâncton transforma os compostos que contêm carbono (C), azoto (N), fósforo (P), e silício (Si), e afeta a sua disponibilidade para a restante produção biológica em profundidade (Falkowski, 2012).

As comunidades fitoplanctónicas reagem rapidamente às mudanças ambientais, alterando a sua composição e abundância (Lombard *et al.*, 2019) e, por isso, poderão ser, em determinadas áreas, indicadores úteis da alteração das condições oceanográficas e do clima, assim como da qualidade da água (Jaanus *et al.*, 2009), como a eutrofização ou a acidificação do oceano (Castellani & Edwards, 2017). A estrutura do fitoplâncton avaliada a partir da composição de espécies e da biomassa, pode ser monitorizada através de bases de dados (Davies *et al.*, 2016), o que possibilita a deteção de proliferações nocivas de algas (*Harmful Algal Blooms* - HAB) (Hallegraeff, 2010) e permite avaliar o estado ambiental (Fonseca *et al.*, 2014; Vadrucci *et al.*, 2007).

As alterações na composição da comunidade podem ter consequências para os outros níveis da cadeia trófica marinha (por exemplo, Reynolds, 2006). Por conseguinte, importa saber se as causas dessas alterações são naturais ou se, pelo contrário, se devem a modificações provocadas pelas alterações climáticas (Brotas *et al.*, 2023). As implicações no crescimento, distribuição, reprodução e na evolução das comunidades planctónicas (Falkowski, 2012;

Marañón, 2015) deverão ser analisadas uma vez que a biodiversidade do fitoplâncton é importante para a estabilidade dos ecossistemas e para a biogeoquímica marinha (Dutkiewicz *et al.*, 2020).

No contexto da Diretiva Quadro Estratégia Marinha (DQEM - Diretiva 2008/56/CE), o fitoplâncton assume um papel central como indicador da qualidade ecológica, dada a sua rápida resposta às variações nas condições ambientais e às pressões antrópicas (Comissão Europeia, 2017; Parlamento Europeu e Conselho, 2008). A monitorização da sua biomassa (através da clorofila *a*), da composição taxonómica e da frequência de florações permite avaliar alterações no funcionamento dos ecossistemas, nomeadamente, aquelas associadas a fenómenos de enriquecimento por nutrientes, poluição ou alterações climáticas (Carstensen, 2007; Devlin *et al.*, 2011).

O conhecimento das comunidades fitoplanctónicas das zonas costeiras e de elevada produtividade é superior às existentes no ambiente marinho pelágico (Buitenhuis *et al.*, 2013; Righetti *et al.*, 2020) devido, em parte, ao custo da amostragem longe da costa. As primeiras estimativas globais indicavam a descrição de mais de 4300 espécies de fitoplâncton marinho (Sournia *et al.*, 1991), distribuídas por, pelo menos, seis grandes clados taxonómicos (Falkowski *et al.*, 2004). No entanto, estimativas subsequentes sugerem que a diversidade total do fitoplâncton marinho é substancialmente superior, podendo ultrapassar as 20 000 espécies (Falkowski *et al.*, 2003). Também em Dutkiewicz *et al.* (2020) e Righetti *et al.* (2020) se corroboram a grande diversidade do fitoplâncton eucariótico cuja distribuição global é influenciada por fatores como a temperatura e a disponibilidade de nutrientes. A base de dados taxonómica *AlgaeBase* (Guiry & Guiry, 2024) reporta, atualmente, mais de 100 000 espécies de algas fotossintéticas descritas, incluindo organismos marinhos e de água doce, tanto planctónicos como bentónicos. Este valor engloba microalgas e macroalgas pertencentes a vários grupos taxonómicos, como diatomáceas e dinoflagelados fotossintéticos, não se restringindo, contudo, ao fitoplâncton marinho nem, especificamente, ao microfitoplâncton. No que respeita, especificamente, ao microfitoplâncton, as diatomáceas e os dinoflagelados constituem os grupos mais diversos e ecologicamente relevantes. As diatomáceas incluem, atualmente, entre 10 000 e 20 000 espécies descritas, embora estudos baseados em filogenia molecular e abordagens de *metabarcoding* sugiram que a

diversidade real poderá ser significativamente superior, em resultado da presença de elevada diversidade críptica e de numerosas linhagens ainda não caracterizadas (Malviya *et al.*, 2016; Vargas *et al.*, 2015). Os dinoflagelados marinhos compreendem mais de 2500 espécies descritas, muitas das quais pertencentes ao microfitoplâncton, apresentando uma elevada diversidade morfológica, funcional e ecológica, que inclui formas fotossintéticas, mixotróficas e heterotróficas (Wu *et al.*, 2024). Abordagens recentes baseadas em sequenciação de nova geração evidenciam que a diversidade de diatomáceas e, sobretudo, de dinoflagelados tem sido, sistematicamente, subestimada pelos métodos microscópicos tradicionais, particularmente nas frações de tamanho intermédio, entre 5 e 20  $\mu\text{m}$  e entre 20 e 180  $\mu\text{m}$ , nas quais os dinoflagelados surgem, frequentemente, como o grupo dominante entre os eucariontes fotossintéticos marinhos (Pierella Karlusich *et al.*, 2023).

O carbono, como principal componente estrutural de organismos fotoautotróficos e heterotróficos, constitui a base para comparações de biomassa em toda a comunidade, bem como em grupos específicos (Menden-Deuer & Lessard, 2000) e é um parâmetro útil para entender o papel dos principais grupos funcionais dentro da comunidade de plâncton (Linacre *et al.*, 2021).

A observação microscópica é uma forma de obter informações dos táxons de fitoplâncton, ao nível das espécies, apesar de ser um processo exigente e moroso. Por isso, não é surpreendente que os dados publicados e disponíveis sejam poucos, mesmo para espécies ecologicamente importantes (Brotas *et al.*, 2022). Já o cálculo do biovolume, com base em modelos geométricos das células de fitoplâncton e a sua conversão em biomassa, são comuns em estudos de ecologia do fitoplâncton (por exemplo, em: Brotas *et al.*, 2023; Hillebrand & Sommer, 1997; Linacre *et al.*, 2021).

As áreas oligotróficas com concentrações de clorofila *a* inferior a 0.1 mg  $\text{m}^{-3}$ , apresentam, normalmente, baixos níveis de produtividade biológica (Santos *et al.*, 2013; Ulloa & Grob, 2009). A clorofila *a* é fundamental para a realização da fotossíntese e está presente em todos os organismos fotossintéticos (Björn *et al.*, 2009). Esta constitui um marcador fundamental para a estimativa da abundância e diversidade do fitoplâncton estando associada a genes fundamentais da fotossíntese e é de grande utilidade na distinção dos principais grupos fitoplanctónicos (Pierella Karlusich *et al.*, 2023). Os mesmos autores

sublinham a existência de uma relação considerável entre a clorofila *a* e a abundância do fitoplâncton nas diferentes frações de tamanho, reforçando-se, assim, o seu papel na produtividade primária marinha. A clorofila *a* é, frequentemente, usada como um *proxy* para determinar o carbono do fitoplâncton (Graff *et al.*, 2015; Sauzède *et al.*, 2015).

A presença de características hidrodinâmicas em mesoescala, como frentes (Le Fèvre, 1986), remoinhos (Falkowski *et al.*, 1991) ou a existência de montes submarinos, por exemplo, Boehlert & Genin (1987), podem contribuir para aumentar a biomassa de plâncton e a produção e/ou retenção de matéria orgânica (Huskin, 2001; Rowden *et al.*, 2010) nas regiões oligotróficas. Nos montes submarinos, fenómenos oceanográficos físicos, como o *upwelling* localizado, a mistura turbulenta e a retenção de partículas pela formação de uma coluna de *Taylor*, podem levar ao aumento de nutrientes na zona eufótica e, por conseguinte, à produtividade biológica (White *et al.*, 2007). Concentrações mais altas de clorofila *a* foram já registadas sobre montes submarinos baixos (Dower *et al.*, 1992; Genin & Boehlert, 1985). Foi sugerido também, como causas possíveis, o afundamento passivo do fitoplâncton produzido localmente (Kiriakoulakis *et al.*, 2009; Vilas *et al.*, 2009), além do "efeito de monte submarino" sobre a estrutura da comunidade microbiana e biomassa, em situações pontuais (Mendonça *et al.*, 2012). Tal como na maior parte do giro subtropical, as águas ao redor do arquipélago dos Açores são oligotróficas, com uma biomassa fitoplanctónica relativamente baixa. Contudo, as condições particulares de turbulência provocada por ilhas e outros fenómenos topográficos podem resultar numa produtividade maior. O *Island Mass Effect* (IME), inicialmente descrito por Doty & Oguri (1956), é conhecido como responsável pelo aumento na produção fitoplanctónica nas imediações de ilhas, através de mecanismos diversos como o *upwelling* costeiro, a turbulência local e o fornecimento de nutrientes por escoamento superficial ou descarga subterrânea de água doce. Estudos clássicos, como o de Gilmartin & Revelante (1974), já demonstravam aumentos consideráveis na biomassa e na produção primária do fitoplâncton perto das ilhas havaianas, reforçando o papel da morfologia insular e da circulação costeira nesse enriquecimento. Mais recentemente, Gove *et al.* (2016) confirmaram a existência de *hotspots* biológicos em torno de ilhas oceânicas isoladas, mesmo em bacias oligotróficas, evidenciando a importância

destes mecanismos locais na estruturação da produtividade marinha. De Falco *et al.* (2022) acrescentam que o IME não é um fenómeno uniforme, mas pode variar muito de acordo com o tipo de ilha, batimetria local e intensidade das interações físico-biogeoquímicas, sendo particularmente importante em ilhas oceânicas como as dos Açores, onde a estrutura da comunidade planctónica também é afetada. Kämpf (2024) demonstrou, através de modelação hidrodinâmica tridimensional acoplada a um modelo NP (nutriente-fitoplâncton), que eventos de vento de curta duração (2-5 dias) são capazes de induzir *upwelling* de nutrientes na zona eufótica envolvente de ilhas de recife tropicais, desencadeando *blooms* fitoplanctónicos significativos. A magnitude deste efeito depende da intensidade e da duração dos ventos, do tamanho das ilhas e da estratificação da coluna de água. Estes resultados fornecem dados que permitem sustentar e reforçar o IME.

Neste contexto, e considerando a relevância dos processos físicos e biológicos associados a ilhas e montes submarinos na modulação da produtividade em regiões oligotróficas, torna-se importante aprofundar o conhecimento sobre a comunidade fitoplanctónica presente em áreas com estas características no Atlântico Nordeste. Assim sendo, esta dissertação é o resultado do estudo da composição e da distribuição da comunidade microfitoplanctónica, bem como da avaliação da biomassa de carbono destes organismos no Arquipélago dos Açores, concretamente, nas ilhas das Flores, da Terceira e de Santa Maria e nos Bancos submarinos Princesa Alice e Formigas.

## 1.1. Microfitoplâncton

O fitoplâncton diz respeito a organismos fotoautotróficos e mixotróficos que contribuem para as produções primária e secundária (Flynn *et al.*, 2013). É dividido por várias classes taxonómicas, com tamanhos celulares variáveis desde 0.6 a 200  $\mu\text{m}$ , que desempenham diferentes funções ecológicas e apresentam diferentes necessidades, em termos de nutrientes (Brotas *et al.*, 2022).

O microfitoplâncton ou microplâncton, mais facilmente observado com microscopia ótica, é constituído por organismos com tamanhos entre 20-200  $\mu\text{m}$ , sendo considerado “plâncton de rede”. Os organismos microfitoplanctónicos são

elementos fundamentais para a produção de oxigénio, para a cadeia alimentar marinha e para a reciclagem de nutrientes (Kaufmann *et al.*, 2015).

### I.1.1. Diatomáceas

As diatomáceas são organismos autotróficos marinhos ubíquos e, frequentemente, os mais dominantes (Fehling *et al.*, 2007) e muitas das suas espécies são cosmopolitas (Finlay, 2002). Outras encontram-se em áreas geográficas mais circunscritas (por exemplo, Vyverman *et al.*, 2007). São classificadas como algas eucarióticas, geralmente unicelulares, de tamanho microscópico, pertencentes ao Supergrupo SAR (Stramenopiles - Alveolata - Rhizaria), ao Superfilo Stramenopiles (Heterokonta), ao Clado Diatomista e ao Filo Bacillariophyta (Adl *et al.*, 2019). A sua elevada diversidade e abundância em, praticamente, todos os habitats aquáticos fazem das diatomáceas um dos grupos mais importantes da Terra, responsável por cerca de 20% da produtividade primária global (Falkowski *et al.*, 1998; Mann, 1999), pela captação de, pelo menos, 25% do CO<sub>2</sub> atmosférico (Field *et al.*, 1998; Nelson *et al.*, 1995) e pela produção de um quinto do oxigénio que respiramos (Leblanc *et al.*, 2012), o que as torna mais produtivas do que todas as florestas tropicais do mundo (Field *et al.*, 1998). A estimativa atual de todas as diatomáceas vivas varia entre 10 000 e 200 000 espécies (Armbrust, 2009), contando-se de 1400 a 1800 espécies, como planctónica marinha (Sournia *et al.*, 1991).

Em áreas oligotróficas, as diatomáceas não representam mais do que 25-30% da produção primária (Nelson *et al.*, 1995) mas, em zonas significativamente produtivas, as diatomáceas predominam, desempenhando um papel fundamental nas cadeias alimentares, graças ao fornecimento de energia para os níveis tróficos superiores (Falkowski *et al.*, 1998) e à sua participação na reciclagem global de muitos elementos, particularmente, de C e de Si (Mann, 1999). A característica mais distintiva deste grupo de algas é a presença de uma elaborada parede celular composta por sílica (designada por frústula). Assemelha-se a uma caixa de *Petri* com uma parte superior, a epiteca, e uma parte inferior, a hipoteca (Hoppenrath *et al.*, 2009).

A classificação morfológica tradicional das diatomáceas em penadas e centradas (Kraberg & Stern, 2017) tem sido utilizada pelos taxonomistas há mais

de cem anos. As diatomáceas centradas (ou cêntricas) apresentam simetria radial e são, geralmente, planctônicas, com frústulas circulares ou poligonais, típicas de ambientes marinhos pelágicos. Já as penadas possuem simetria bilateral e são, sobretudo, bentônicas, com frústulas alongadas ou ovais. No entanto, estudos moleculares demonstram que esta divisão não reflete as verdadeiras relações filogenéticas (Kaczmarska *et al.*, 2000; Medlin *et al.*, 1996). Análises filogenéticas baseadas em genomas mais recentes confirmam que muitos grupos morfológicamente definidos não são monofiléticos (Medlin & Kaczmarska, 2004; Sato *et al.*, 2020; Vargas *et al.*, 2015) e que as diatomáceas penadas evoluíram a partir de linhagens centradas, tornando esta separação morfológica inadequada à luz da filogenia molecular contemporânea. A criação da classe Mediophyceae (inclui diatomáceas centrais bipolares e a ordem Thalassiosirales), proposta por Medlin & Kaczmarska (2004), e mantida em sistemas taxonômicos atualizados como o de Adl *et al.* (2019), revela essa revisão, agrupando representantes dessa classe, filogeneticamente mais próximos das penadas do que das centradas radiais. As classes Coscinodiscophyceae (que inclui as diatomáceas centrais radiais) e Bacillariophyceae (que inclui as diatomáceas penadas) continuam a ser utilizadas. Assim, a divisão entre penadas e centradas é apenas útil para a identificação de campo e organização taxonômica prática (Mann & Vanormelingen, 2013; Round *et al.*, 1990).

### I.1.2. Dinoflagelados

O segundo maior grupo de microfitoplâncton são os dinoflagelados que apresentam dois flagelos característicos, um dos quais envolve a célula num sulco transversal chamado “cíngulo”, e o outro projetando-se para a parte posterior da célula (Delwiche, 2007; Fensome *et al.*, 1999). Segundo Adl *et al.* (2019), os dinoflagelados pertencem ao Supergrupo SAR (Stramenopiles – Alveolata – Rhizaria), ao Grupo Alveolata e ao Filo Dinoflagellata.

Alguns dinoflagelados são capazes de produzir toxinas que são libertadas no oceano. O efeito cumulativo destas toxinas pode afetar outros organismos, causando, inclusivamente, a sua morte com consequências prejudiciais para a

saúde humana e animal e para a economia (Hallegraeff, 1993; Menden-Deuer & Lessard, 2000; Shin *et al.*, 2016).

Os dinoflagelados são encontrados em todos os ambientes aquáticos, mas é nos marinhos que apresenta uma grande diversificação. O verdadeiro endemismo dos dinoflagelados é raro (Taylor *et al.*, 2008). Dados mais recentes compilados em bases de dados como *AlgaeBase* (Guiry & Guiry, 2024) e em revisões taxonômicas (Hoppenrath *et al.*, 2014) confirmam a elevada diversidade deste grupo e mostram a contínua revisão da sua classificação. Estima-se que o número de espécies vivas de dinoflagelados seja de 2000 a 2500 atribuídas a cerca de 300 géneros (Hoppenrath *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2008). Cerca de 90% das espécies de dinoflagelados são planctónicas e responsáveis por uma grande parte da produtividade primária.

Os dinoflagelados podem ser autotróficos, mixotróficos e heterotróficos (Hoppenrath, 2017; Menden-Deuer & Lessard, 2000). Alguns são importantes fontes de bioluminescência nos oceanos (Taylor *et al.*, 2008). Estes são um grupo, funcionalmente, diverso e importante (Keeling, 2004) devido à sua história evolutiva e capacidade de adquirir genes horizontalmente de organismos não relacionados. Os dinoflagelados também contribuem para o fluxo de carbono e, assim, fornecem energia para águas profundas e peixes demersais (Munir *et al.*, 2015). São unicelulares, mas podem formar cadeias e são, geralmente, divididos, com base na morfologia, em dois grandes grupos: os tecados e atecados, embora, à semelhança do que acontece com as diatomáceas, não haja uma consistência filogenética (Daugbjerg *et al.* 2000). Os dinoflagelados tecados são cobertos por uma série de placas de celulose, que formam a teca. Os dinoflagelados atecados não possuem estas placas (Escobar-Morales & Hernández-Becerril, 2015; Menden-Deuer & Lessard, 2000).

## 1.2. Parâmetros físico-químicos

O crescimento do fitoplâncton depende da temperatura e da disponibilidade de luz e de nutrientes dissolvidos, como o azoto ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), o fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), o silício ( $\text{Si(OH)}_4$ ) e o ferro ( $\text{Fe(II)}$ ,  $\text{Fe(III)}$ ) (Castellani & Edwards, 2017). Para além destes elementos, é necessário também carbono inorgânico, geralmente, sob a forma de  $\text{CO}_2$  dissolvido (Verlecar & Desai, 2004). Na zona

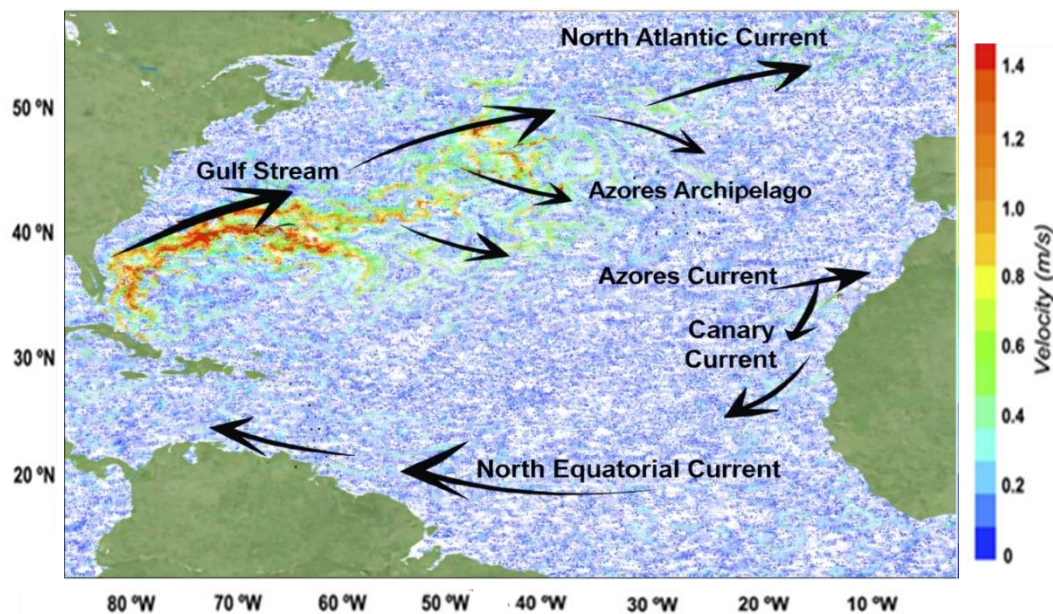
superficial do oceano, os nutrientes chegam, sobretudo, por processos de mistura vertical, *upwelling* de águas profundas e, no caso do ferro, pela deposição atmosférica de poeiras desérticas (Barcelos e Ramos *et al.*, 2017; Jickells *et al.*, 2005). A distribuição destes nutrientes não é homogênea, o que influencia diretamente a abundância e a composição das comunidades fitoplanctónicas. Em muitas regiões, o crescimento do fitoplâncton é limitado pela disponibilidade simultânea de múltiplos nutrientes. Nas regiões subtropicais, por exemplo, é a escassez de nutrientes — e não de luz — que tende a ser o principal fator limitante (Barcelos e Ramos *et al.*, 2017).

A densidade da água, determinada sobretudo pela temperatura e salinidade, regula a estratificação vertical da coluna de água e, por conseguinte, a espessura e estabilidade da camada de mistura de profundidade (MLD - *Mixed Layer Depth*; Talley *et al.*, 2011). Esta camada atua como uma barreira física que separa as águas superficiais ricas em luz das águas profundas ricas em nutrientes. A ação do vento é um dos principais fatores que influencia a MLD, promovendo a turbulência e a mistura vertical (Franks, 2015; Sverdrup, 1953). Quando o vento é suficientemente forte e persistente, pode aprofundar a MLD, permitindo o transporte de nutrientes a partir das camadas mais profundas até à zona fótica, o que favorece a produtividade primária (Behrenfeld, 2010). Por outro lado, em períodos de fraca agitação pelo vento ou aquecimento intenso da superfície, ocorre uma estratificação mais acentuada, com uma redução da MLD. Esta estratificação limita a renovação dos nutrientes na zona fótica, o que leva à redução da produtividade do fitoplâncton, sobretudo, em regiões oligotróficas. Nestes contextos, a biomassa fitoplanctónica tende a concentrar-se em profundidades intermédias, onde há um equilíbrio entre a disponibilidade de luz e nutrientes, formando-se o máximo de clorofila subsuperficial (DCM – *Deep Chlorophyll Maximum*), localizado, geralmente, entre 100 e 150 m de profundidade (Cullen *et al.*, 1982; Fennel & Boss, 2003; Waniek *et al.*, 2005). A DCM corresponde à camada da coluna de água onde se observa a maior concentração de biomassa fitoplanctónica, em termos de pigmentos fotossintéticos, situando-se, normalmente, nas proximidades da termoclina superior, com luz suficiente e maior disponibilidade de nutrientes que favorece o crescimento do fitoplâncton. A amostragem nesta profundidade é fundamental para uma caracterização representativa da comunidade microfitoplanctónica em

termos de biomassa de carbono, sendo a concentração de clorofila *a* um indicador útil da abundância total de fitoplâncton (Cullen *et al.*, 1982). Nesses locais, a coluna de água fortemente estratificada limita a transferência de nutrientes do oceano profundo para as regiões onde há luz suficiente para a fotossíntese, de forma que a produtividade primária é bastante limitada por nutrientes. De acordo com van de Poll *et al.* (2013), no oceano aberto, a estratificação vertical da densidade é um processo importante na definição da disponibilidade de recursos para o crescimento do fitoplâncton. A interação entre a densidade da água, o vento e a MLD é, assim, determinante na variabilidade espacial e temporal da biomassa e produtividade fitoplanctónica (Behrenfeld & Boss, 2018; Franks, 2015).

### I.3. Caracterização oceanográfica - Circulação global e massas de água no Arquipélago dos Açores

O padrão de circulação oceânica no Atlântico Norte é dominado por dois grandes giros: o subtropical, com circulação anticiclónica, e o subpolar, com circulação ciclónica (Castellani & Edwards, 2017). A Corrente do Golfo (CG) é um componente essencial deste sistema, transportando águas quentes para norte no lado ocidental do Atlântico e retornando a sul através das porções central e leste. Esta corrente influencia diretamente o arquipélago através das suas duas ramificações principais: a Corrente dos Açores (CA) e a Corrente do Atlântico Norte ou *North Atlantic Current* (NAC) (Bower & von Appen, 2008; Klein & Siedler, 1989). A dinâmica geral deste sistema é ilustrada na Figura I-1, que apresenta a circulação superficial média no Atlântico Norte com base na magnitude da velocidade das correntes, evidenciando o padrão anticiclónico do Giro Subtropical do Atlântico Norte e a posição do Arquipélago dos Açores no interior deste sistema.



**Figura I-1:** Circulação superficial no Atlântico Norte, evidenciando o Giro Subtropical do Atlântico Norte e a região do Arquipélago dos Açores. O fundo representa a magnitude média da velocidade das correntes superficiais. As setas indicam o sentido dominante da circulação média de larga escala, destacando a continuidade dinâmica entre a Corrente do Golfo, a Corrente do Atlântico Norte e a Corrente dos Açores, bem como o ramo oriental associado à Corrente de Canárias e o fecho meridional do giro através da Corrente Equatorial Norte. Figura adaptada de Sala *et al.* (2016).

Os Açores situam-se numa zona de transição entre estas duas correntes: a NAC, a norte, transporta águas relativamente mais frias, enquanto a CA, a sul, é caracterizada por uma forte atividade dinâmica, marcada por meandros e remoinhos oceânicos persistentes ao longo do ano (Juliano & Alves, 2007; Santos *et al.*, 1995). A CA está associada a uma importante frente termohalina, que separa águas frias do norte de águas mais quentes e salinas provenientes do sul (Gould, 1985). A sua instabilidade gera remoinhos que afetam o transporte de propriedades físicas e biológicas. Esses remoinhos podem interagir com a topografia submarina da região, sendo em alguns casos dissipados por ela (Silva-Fernandes & Peliz, 2020).

Na província do Giro Subtropical do Atlântico Norte (NAST), a produtividade primária é, em geral, baixa, apresentando um ciclo sazonal bem definido, com um pico principal entre janeiro e março e um segundo aumento no outono (Longhurst, 1995; Narciso *et al.*, 2016). Este padrão resulta da interação entre a estratificação sazonal da coluna de água e os processos de mistura vertical, os quais controlam a disponibilidade de nutrientes e a composição do fitoplâncton (Waniek *et al.*, 2005). Durante o inverno, a intensificação da mistura das massas

de água reabastece a zona eufótica com nutrientes, promovendo a produtividade fitoplanctónica. À medida que a estratificação térmica se intensifica na primavera e no verão, a entrada de nutrientes na superfície diminui, gradualmente, conduzindo a um mínimo produtivo no final do verão (Silva *et al.*, 2013). A produção primária volta a aumentar no outono, atingindo o seu máximo entre dezembro e fevereiro, geralmente, entre os 100 e os 150 m de profundidade (Waniek *et al.*, 2005).

#### 1.4. Biomassa de carbono nos organismos microfitoplanctónicos

A abundância e a biomassa são importantes para a compreensão da dinâmica das comunidades de fitoplâncton (Harris, 1988; Longhurst, 1995; Menden-Deuer & Lessard, 2000; Montagnes *et al.*, 1994) e fundamentais nos estudos de produtividade primária dos oceanos (Munir *et al.*, 2015; Saccà, 2016; Sun & Liu, 2003; Veldhuis & Kraay, 2004). Também para Harrison *et al.* (2015), as estimativas da biomassa de carbono e da abundância de diferentes espécies constituem as variáveis mais importantes em séries temporais de fitoplâncton, já que estas moldam a teia alimentar planctónica e determinam a produtividade de todo o ecossistema pelágico. Como apontado por Sathyendranath *et al.* (2020), a estimativa precisa da biomassa global de fitoplâncton em termos de carbono desempenha um papel fundamental na compreensão dos ciclos biogeoquímicos oceânicos. A compreensão e a modelização do ecossistema aquático não são possíveis sem o conhecimento da composição das espécies, produtividade e biomassa do fitoplâncton (Olenina *et al.*, 2006). Trabalhos como os de Hillebrand *et al.* (1999); Olenina *et al.* (2006); Sun & Liu (2003), e de Vadrucci *et al.* (2007, 2013) são referências, frequentemente, utilizadas por diversos investigadores.

As estimativas de biomassa de carbono de organismos planctónicos são, geralmente, feitas através da conversão de medidas de tamanho microscópico em volumes de célula. Estes são, então, convertidos em biomassa de carbono usando carbono derivado, empírica ou teoricamente, para proporções de volume (Vadrucci *et al.*, 2013). As relações carbono-volume (C:vol) foram relatadas para vários grupos planctónicos, como bactérias heterotróficas e diatomáceas, entre outros (Menden-Deuer & Lessard, 2000).

Guo *et al.* (2023), apesar de reconhecerem as limitações do estudo da biomassa de carbono do fitoplâncton, sublinham que este tem o potencial de fornecer informações importantes sobre vários processos oceanográficos, como a exportação vertical de carbono e a produtividade da cadeia alimentar oceânica. Como produtores primários no oceano, o fitoplâncton pode afetar o fluxo de energia e o ciclo de materiais (Graff & Menden-Deuer, 2016). Portanto, compreender a distribuição da biomassa do fitoplâncton é essencial para explorar a estrutura da cadeia alimentar e o ciclo de materiais no oceano (Taylor & Landry, 2018). Este método permite a estimativa do carbono do fitoplâncton ao nível da espécie e do género e tem sido aplicado em diversas regiões oceânicas tais como: Oceano Atlântico Norte (Brotas *et al.*, 2013, 2022, 2023; Marañón & Holligan, 1999); Oceano Antártico (Cornet-Barthaux *et al.*, 2007); Atlântico Nordeste, incluindo o Mar Mediterrâneo (Sal *et al.*, 2013); regiões do Oceano Índico e Antártico próximos da Austrália (Davies *et al.*, 2016); Golfo do México (Linacre *et al.*, 2021), e Mar Báltico (Olenina *et al.*, 2006).

### 1.5. Produtividade na região oceânica do Arquipélago dos Açores

As águas que rodeiam o Arquipélago dos Açores apresentam características oligotróficas resultantes, principalmente, da sua localização em latitudes temperadas e à proximidade do NAST. A região é influenciada por importantes correntes oceânicas, como a CA e a Corrente das Canárias (CC), que condicionam a disponibilidade de nutrientes (George *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2013). Este contexto cria condições propícias para o estudo de comunidades fitoplancónicas adaptadas a ambientes com baixos níveis de nutrientes, mas que podem ser, ocasionalmente, enriquecidos por aumentos localizados de nutrientes (Barcelos e Ramos *et al.*, 2017; George *et al.*, 2018; Marañón, 2015). A baixa produtividade primária observada na região resulta da escassez de nutrientes essenciais, o que é típico de sistemas oligotróficos (Woods & Barkmann, 1995). Nestes ambientes, as diatomáceas representam, geralmente, menos de 2% da biomassa fotossintética total, refletindo a limitação de elementos como o silício. Apesar disso, eventos esporádicos de enriquecimento podem provocar alterações pontuais na composição e biomassa das comunidades fitoplanctónicas. Embora os Açores estejam situados no Atlântico Nordeste, numa área onde

predomina a influência do oceano aberto, as zonas costeiras do arquipélago são, igualmente, afetadas por processos locais, como a interação com a topografia submarina e a variabilidade da circulação próxima da costa (Aristegui *et al.*, 2009). Estas áreas costeiras tendem a ser mais produtivas do que as regiões oceânicas adjacentes, à semelhança do que se observa noutras partes do globo (Longhurst, 1998). Apesar da baixa produtividade local, estas regiões cobrem mais de 60% da superfície oceânica e podem contribuir com mais de 30% da produção primária global (Longhurst, 1995).

Alguns estudos têm sido feitos nesta província geográfica, no Oceano Atlântico Norte, a respeito do plâncton (como exemplos: Allen *et al.*, 2005; Aristegui *et al.*, 2009; Brotas *et al.*, 2013, 2022, 2023; Head *et al.*, 2002; Leterme *et al.*, 2006; Luz *et al.*, 2022; Marañón *et al.*, 2000, 2001, 2003, 2012; Martin & Christiansen, 2009; Mendonça *et al.*, 2012; Morato *et al.*, 2013; Narciso *et al.*, 2016; Pérez *et al.*, 2006; Sala *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2013; Savidge *et al.*, 1995; Silva *et al.*, 2013; Teira *et al.*, 2005; van de Poll *et al.*, 2013; Veldhuis & Kraay, 2004; Woods, 1995; Xi *et al.*, 2023). No entanto, na ilha das Flores e nos Bancos submarinos Princesa Alice e Formigas, em particular, pelo que sabemos, não existe ainda nenhum estudo publicado. Neste sentido, a presente dissertação pretende dar o seu contributo para um maior conhecimento da produtividade nas ilhas das Flores, da Terceira e de Santa Maria e nos montes submarinos Princesa Alice e Formigas. Para orientar este estudo foram postuladas as seguintes hipóteses nulas:

**1.**  $H_0$ : Não há influência detetável das ilhas na abundância, composição e distribuição da comunidade fitoplanctónica, especialmente, não há *upwelling*, o que poderia aumentar o crescimento do microfitoplâncton.

**2.**  $H_0$ : Não há diferença entre a abundância e a composição da comunidade fitoplanctónica perto da costa e longe da costa.

## II. Material e Métodos

### II.1. Área de Estudo

O Arquipélago dos Açores é constituído por um grupo oceânico de ilhas localizadas no Oceano Atlântico Norte, entre as latitudes 36°55'– 39°43' N e as longitudes 24°46'– 31°16'W, a cerca de 1300 km a oeste de Portugal Continental e a 1600 km a leste da América do Norte (Gonçalves *et al.*, 2015). Este Arquipélago é constituído por nove ilhas, alinhadas segundo uma orientação noroeste-sudeste, ao longo de 615 km, que se dividem em três grupos de acordo com a sua posição geográfica: o grupo ocidental, do Corvo e das Flores; o grupo central do Faial, Pico, Graciosa, São Jorge e Terceira; e o oriental, o grupo de São Miguel e Santa Maria (Azevedo & Ferreira, 2006; Santos *et al.*, 2013), localizadas dentro da província biogeoquímica do NAST, conforme definido por Longhurst (1995).

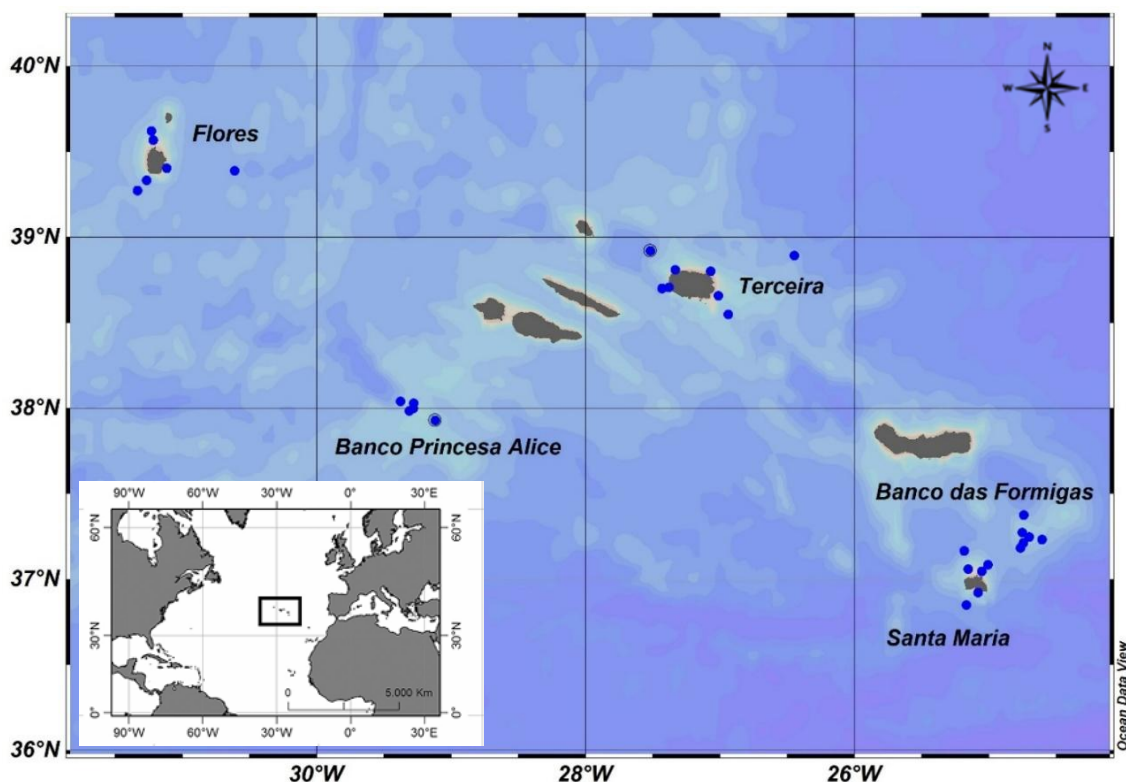
A região dos Açores caracteriza-se por uma pequena plataforma rodeada por águas profundas, onde se encontram vários montes submarinos, formações topográficas comuns na área (Valente, 2013), que se elevam do fundo oceânico a mais de 1000 m e cujo cume permanece abaixo da superfície do mar (Pitcher *et al.*, 2007).

### II.2. Colheita de dados e das amostras

Durante a expedição científica M150 BIODIAZ - *BIODiversity of the AZores* (George *et al.*, 2018), decorrida entre os dias 27 de agosto e 3 de outubro de 2018 (Cádiz-Ponta Delgada), a bordo do navio de investigação *RV METEOR*, foram recolhidos dados de parâmetros físico-químicos, nas profundidades onde foram obtidas as amostras para a análise do microfitoplâncton, incluindo de temperatura, salinidade, pressão, oxigénio dissolvido e de fluorescência *in situ*. Esta última foi utilizada como indicador da concentração de clorofila *a* e medida com recurso a um sistema CTD *Seabird* (modelo SBE 911*plus*) acoplado a uma *Rosette*, permitindo a obtenção de perfis verticais da coluna de água. Foram, ainda, obtidas amostras de água para análise de nutrientes dissolvidos (nitratos + nitritos, fosfatos, silicatos). A intensidade do vento em cada estação foi também

obtida, neste caso, pelo sistema meteorológico do navio. Todos estes parâmetros foram analisados para o necessário estabelecimento de relações causais e explicativas para a composição e distribuição da comunidade de microfitoplâncton pelas ilhas e montes, mas não resultaram do processo de investigação deste trabalho em particular. Foram recolhidas também amostras para análise de fitopigmentos por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (*High Performance Liquid Chromatography*, HPLC), de nanofitoplâncton por microscopia de luz polarizada e de picofitoplâncton por citometria de fluxo. Estas últimas não foram objeto de análise do presente trabalho.

As amostras discretas do microfitoplâncton foram obtidas em 31 estações de amostragem (Figura II-1) localizadas entre os 40° e os 36° N de latitude e os 32° e os 24° W de longitude. Em cada estação, a recolha foi realizada a uma única profundidade — correspondente à DCM — determinada com base nos perfis de fluorescência *in situ* (cf. Figura III-1).



**Figura II-1:** Localização do Arquipélago dos Açores no Atlântico Norte (Fonte: Gonçalves *et al.*, 2015) e localização das 31 estações de amostragem distribuídas pelas ilhas das Flores, da Terceira e de Santa Maria e pelos montes submarinos Banco Princesa Alice e Banco das Formigas, no Arquipélago dos Açores, onde foram recolhidas amostras discretas de água para análise da comunidade microfitoplanctónica.

No caso das amostras para análise de nutrientes dissolvidos, a água foi recolhida em cinco profundidades distintas, de forma a obter um perfil vertical mais completo da disponibilidade de nutrientes na coluna de água.

Das 90 estações amostradas durante a expedição, foram selecionadas 31 para este estudo (Tabela A-I, Anexo A), de forma a representar diferentes zonas geográficas — desde áreas próximas de ilhas e montes submarinos até regiões mais distantes. A seleção também pretendeu tornar exequível a prossecução deste estudo, tendo em consideração o tempo disponível para a análise laboratorial. Na Tabela II-1 é possível verificar a distribuição das amostras pelas diferentes ilhas e montes submarinos deste estudo.

**Tabela II-1:** Distribuição das amostras selecionadas pelas diferentes localizações: ilhas (Flores, Terceira e Santa Maria) e montes submarinos (Banco Princesa Alice e Banco das Formigas).

Localização	Flores	Pr. Alice	Terceira	Sta. Maria	Formigas
Nº de amostras	6	5	8	6	6

### II.3. Parâmetros físico-químicos

Os dados de temperatura, salinidade, pressão, densidade (calculada a partir da temperatura, salinidade e pressão) e de oxigénio dissolvido foram obtidos, individualmente, para cada uma das 31 estações de amostragem, à mesma profundidade que a das amostras para a análise de microfitoplâncton. Sempre que possível, o mesmo se fez em relação aos dados relativos às concentrações de nutrientes. Todos estes parâmetros permitem caracterizar a área de estudo em termos ambientais e podem ser usados para contextualizar a distribuição e a abundância do fitoplâncton, bem como a sua biomassa total (Sal *et al.*, 2013).

Em cada estação de amostragem, foram registados perfis verticais contínuos de condutividade, temperatura, pressão, densidade (derivada), oxigénio dissolvido e fluorescência *in situ* (Kaufmann *et al.*, 2020). As medições de temperatura, pressão, salinidade e oxigénio dissolvido utilizadas neste estudo foram processadas e visualizadas com recurso ao *software Ocean Data View* (ODV) (Schlitzer, 2024).

Com base nos perfis verticais de densidade potencial (calculada a partir da temperatura, salinidade e pressão), a MLD foi estimada em cada estação segundo o critério da densidade: a MLD corresponde à profundidade onde a

densidade aumenta em pelo menos  $0.03 \text{ kg m}^{-3}$  relativamente à média da densidade entre 5 e 15 metros (Talley *et al.*, 2011). Este critério é, normalmente, adotado por integrar os efeitos combinados da temperatura e da salinidade sobre a estratificação da coluna de água. Embora a intensidade do vento não seja utilizada diretamente no cálculo da MLD, este parâmetro exerce um papel fundamental na sua variação, ao promover a mistura turbulenta da camada superficial. Assim, valores mais elevados de intensidade do vento tendem a aprofundar a camada de mistura, ao passo que períodos de fraca agitação favorecem a estratificação e tornam a MLD mais rasa (Behrenfeld, 2010; Franks, 2015). Os dados de intensidade do vento (em  $\text{m s}^{-1}$ ), registados pelo sistema meteorológico do navio foram utilizados, neste estudo, como referência para avaliar a influência do vento na coluna de água.

Para as análises de nutrientes, foi recolhido um volume de, aproximadamente, 200 mL de água diretamente das garrafas *Niskin*, após cada operação de recolha. As amostras foram, posteriormente, congeladas a  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  até à sua análise laboratorial em terra (George *et al.*, 2018). As determinações analíticas foram realizadas segundo a metodologia proposta por Hansen & Koroleff (1999), aplicada nas estações amostradas (Tabela A-I -Anexo A e Tabela B-I - Anexo B).

Em 9 das 31 estações não foram recolhidas amostras para análise de nutrientes, estando essas estações identificadas como “NA”, nas mesmas tabelas. Estas correspondem às seguintes localizações: estações 315, 486 e 511 (ilha da Terceira), estações 393, 426 e 467 (ilha de Santa Maria) e estações 539, 560 e 587 (Banco das Formigas). Em quatro situações, foi necessário recorrer a dados de nutrientes provenientes de estações geograficamente próximas (Tabela II-2). De igual modo, em três estações, utilizaram-se os dados de nutrientes de profundidades próximas dentro da mesma estação, dada a inexistência de amostras à profundidade exata (Tabela II-3).

**Tabela II-2:** Estações substituídas por outras geograficamente próximas, com indicação da distância entre ambas, relativamente às concentrações dos nutrientes.

<b>Estação Original</b>	<b>Estação Substituta</b>	<b>Distância (km)</b>
<b>169_70M (Pr. Alice)</b>	171_65M (Pr. Alice)	5.13
<b>291_60M (Terceira)</b>	313_60M (Terceira)	3.64
<b>333_75M (Sta. Maria)</b>	347_65M (Sta. Maria)	5.84
<b>433_45M (Sta. Maria)</b>	465_65M (Sta. Maria)	4.60

**Tabela II-3:** Estações substituídas por amostras recolhidas a profundidades próximas dentro da mesma estação, relativamente às concentrações dos nutrientes.

<b>Estação</b>	<b>Profundidade original (m)</b>	<b>Profundidade substituta (m)</b>	<b>Diferença (m)</b>
<b>238_30M (Terceira)</b>	30	50	20
<b>537_70M (Formigas)</b>	70	80	10
<b>605_40M (Formigas)</b>	40	20	20

## II.4. Análise qualitativa e quantitativa de microfitoplâncton

Durante a expedição M150 (George *et al.*, 2018), foram analisadas 31 amostras de microfitoplâncton com os objetivos de identificar os táxons presentes, quantificar a sua abundância, calcular o biovolume celular e converter esses valores em biomassa de carbono. Para tal, foram recolhidos, aproximadamente, 200 mL de água diretamente das garrafas *Niskin*, imediatamente após cada lançamento do CTD. As amostras foram fixadas com solução de Lugol (2 a 3 mL) e, seguidamente, com formaldeído a 37% (1.5 mL) (Sournia, 1978). A conservação foi feita em frascos escuros, à temperatura ambiente e protegidos da luz, garantindo a estabilidade das amostras ao longo do tempo. A adição de formaldeído foi essencial, dado o intervalo superior a seis meses decorrido entre a recolha e a análise laboratorial (Sournia, 1978).

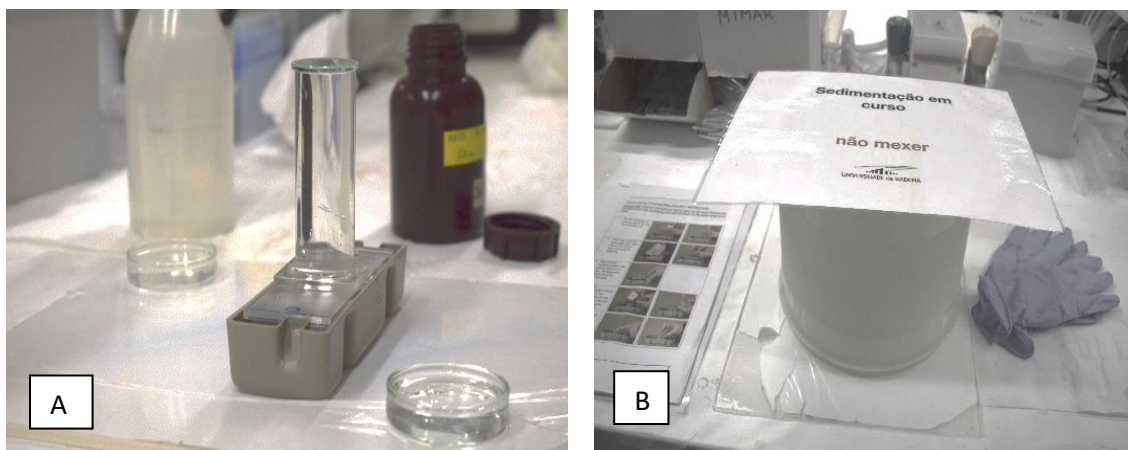
A abundância do microfitoplâncton (cél. L<sup>-1</sup>) foi determinada através do microscópio invertido *DMi8*, *Leica Microsystems*, com contraste de fase e iluminação de campo claro, utilizando o método de sedimentação de Utermöhl (1958), com algumas adaptações. Este método baseia-se na sedimentação de uma alíquota da amostra numa câmara de sedimentação calibrada com a

posterior identificação e contagem das células de microfitoplâncton com um microscópio invertido (Edler & Elbrächter, 2010; Figura II-2).



**Figura II-2:** Microscópio invertido DMI8, *Leica Microsystems* (Fonte: Manfred Kaufmann).

Para cada amostra, foram subamostrados 50 mL de água em colunas de sedimentação. As amostras sedimentaram durante 24 horas, por ação da gravidade, até à deposição do microfitoplâncton no fundo da câmara (Edler & Elbrächter, 2010; Figura II-3).



**Figura II-3:** Câmara de sedimentação utilizada nas análises antes da observação microscópica. **(A)** Sedimentação de uma amostra numa câmara de sedimentação de 50 mL e duas caixas de Petri com água. **(B)** Câmara de sedimentação e caixas de Petri cobertas para manter a humidade durante a sedimentação de, pelo menos, 24 horas.

A contagem celular foi realizada de acordo com o descrito por Edler & Elbrächter (2010), com ampliações progressivas de 200x, 400x e 630x. Considerando a natureza oligotrófica das águas estudadas, toda a área da

câmara foi examinada, segundo faixas horizontais sistemáticas, de forma a contabilizar um mínimo de 200 células por amostra. Com este procedimento, garantiu-se a robustez estatística dos resultados (Munir *et al.*, 2015), assegurando um erro amostral de 14% ao nível de confiança de 95% (Bollmann *et al.*, 2002; Edler & Elbrächter, 2010). Foram analisados 50 mL de cada uma das 31 amostras, sem definição prévia de um número de células por táxon a observar (Otsuka *et al.*, 2022). Em 28 amostras, foram contabilizadas mais de 300 células, sendo que 15 dessas apresentaram contagens superiores a 500. Apenas duas amostras (14\_60M e 143\_90M) registaram valores inferiores a 300 células. O limite de deteção variou entre 20 e 9360 células por litro, considerando um nível de confiança de 95% (Bollmann *et al.*, 2002).

Muitos dos organismos observados apresentavam dimensões inferiores a 20 µm, sobretudo alguns dinoflagelados, o que dificultou a sua identificação. Estas células pertencem à fração de nanofitoplâncton e, devido à limitação do método, não foram contabilizadas na análise do microfitoplâncton.

A maioria dos organismos encontrados foi, taxonomicamente, identificado até ao género específico. Em alguns casos e, sempre que possível, até à espécie de acordo com Dodge (1981) e Hasle & Syvertsen (1996), respeitando o princípio de que a precisão é preferível à resolução taxonómica baixa, quando esta é incerta (Edler & Elbrächter, 2010; Munir *et al.*, 2015). As medições foram efetuadas com o *software* LAS X (*Leica Microsystems*, versão 3.7.4.). Foram criadas categorias taxonómicas agrupadas devido a dificuldades em diferenciar alguns táxons. Em alguns casos, apenas foi possível caracterizar os grupos de microfitoplâncton em diatomáceas e dinoflagelados, como não identificadas (UDiatom e UDino, respetivamente). Para as situações que ofereciam dúvidas, optou-se por categorizar as células que se assemelhavam a dinoflagelados, como *Unidentified Planktonic Organism A* (UPOA) e a diatomáceas como *Unidentified Planktonic Organism B* (UPOB). O táxon das diatomáceas foi distinguido, de acordo com a nomenclatura morfológica tradicional, em cêntricas e penadas, para facilitar o tratamento dos dados, especialmente, nos casos em que não foi possível a identificação ao nível do género, mas a sua distinção morfológica. As diatomáceas cêntricas e penadas não identificadas até ao nível taxonómico da ordem foram inseridas na Ordem Histórica *Centrales* ou *Pennales*, respetivamente (Brotas *et al.*, 2023). Para os dinoflagelados que se

assemelhavam, sem possibilidade de distinção, aos géneros *Heterocapsa*, *Gymnodinium* e *Scrippsiella*, optou-se por criar uma categoria taxonómica aglutinadora denominada “HGS”. Muitos dos registos no conjunto de dados (Tabela B-I, Anexo B) foram identificados até ao nível “género” e listados como spp. e sp.

A identificação taxonómica dos géneros e das espécies teve como base literatura específica, como Omura *et al.* (2012); Hoppenrath *et al.* (2009); Ojeda (2011); Ricard (1987); Round *et al.* (2007); Sournia (1986); Schiller (1933, 1937); Tomas (1997). Outros artigos decisivos na identificação dos organismos foram, por exemplo, Adl *et al.* (2019); Armbrust (2009); Attaran-Fariman & Bolch (2012), Blanco (2020); Daugbjerg *et al.* (2000); Evagelopoulos (2002); Gómez (2012, 2013, 2018, 2020; 2021); Gómez *et al.* (2009; 2010; 2016, 2017); Handy *et al.* (2009); Hoppenrath (2017); Hoppenrath *et al.* (2013, 2019); Iwataki (2008); Kretschmann *et al.* (2015); Li *et al.* (2017); Lundholm *et al.* (2002); Moestrup *et al.* (2014); Nakamura (2019); Nanjappa *et al.* (2013); Potapova (2013); Rines & Theriot (2003); Salas *et al.* (2014); Shin *et al.* (2016); Taylor *et al.* (2008); Teng *et al.* (2013); Tillmann *et al.* (2017, 2023); Witkowski *et al.* (2020) e Yun & Lee (2011).

Para a atualização taxonómica, todos os nomes científicos foram verificados na base de dados internacional *ALGAEBASE* (Guiry & Guiry, 2024), entre 15 de fevereiro e 30 de julho de 2024. A verificação foi complementada com consultas ao *World Register of Marine Species (WoRMS Editorial Board, 2024)* e, sempre que necessário, ao *Nordic Microalgae (Torstensson et al., 2024)*, durante o mesmo período. A classificação taxonómica seguiu os principais conceitos detalhados em Hasle & Syvertsen (1996).

Com o objetivo de determinar a biomassa, foram realizadas medições lineares das células microfitoplanctónicas e calculado o biovolume celular, utilizando modelos geométricos tridimensionais adequados à morfologia celular (Linacre *et al.*, 2021; Vadrucci *et al.*, 2007). O biovolume foi então calculado e convertido em biomassa. Diversos autores (Hillebrand *et al.*, 1999; Sun & Liu, 2003; Vadrucci *et al.*, 2007, 2013) descrevem os modelos e fórmulas aplicáveis aos diferentes táxons, os quais foram utilizados com base na morfologia observada ao nível taxonómico de género. Quando a identificação taxonómica era incerta, o modelo geométrico utilizado para estimar o biovolume foi o mais semelhante disponível.

Sun & Liu (2003) recomendam a medição de, pelo menos, 10 células selecionadas aleatoriamente por grupo, gênero ou espécie, enquanto Smayda (1978) e Hillebrand *et al.* (1999) sugerem a medição de 25 células por espécie. Neste estudo, procurou-se medir, no mínimo, 15 células por táxon ou categoria. Em casos de baixa abundância, as células foram medidas à medida que surgiam nas amostras (Chitari & Anil, 2017).

As estimativas do biovolume (em  $\mu\text{m}^3 \text{ cél}^{-1}$ ) foram obtidas a partir da média das dimensões lineares de cada táxon/categoria, aplicando as fórmulas geométricas que melhor refletiam a forma da célula (Hillebrand *et al.*, 1999; Sun & Liu, 2003), com algumas adaptações, quando necessário. As medições foram realizadas com recurso a *software* LAS X (calibrado anteriormente). Para as categorias das UDiatom e UPOB, optou-se por utilizar a fórmula geométrica, identificada, em Sun & Liu (2003), como cilindro, correspondente à das diatomáceas cêntricas para o cálculo do seu biovolume médio, uma vez que apresentavam uma morfologia a elas semelhante, de acordo com a base de dados de Leblanc *et al.* (2012). O mesmo procedimento foi tido em relação aos UDino e às UPOA, com a fórmula geométrica identificada, em Sun & Liu (2003), como esferoide prolato.

Relativamente ao cálculo do tamanho celular médio, Hillebrand *et al.* (1999) recomendam que o biovolume seja calculado com base na média das dimensões medidas e não a partir da média (ou mediana) de biovolumes individuais. Este critério foi seguido para os dinoflagelados. No caso das diatomáceas, utilizou-se a biomassa de carbono média e o biovolume médio com base nas dimensões mínima e máxima fornecidas pela base de dados de Leblanc *et al.* (2012) o que facilita estudos comparativos (Fonseca *et al.*, 2014). Para os gêneros *Coscinodiscus* e *Rhizosolenia* e para as categorias UDiatom e UPOB, utilizaram-se os dados obtidos neste estudo, dada a menor variabilidade de tamanho observada, que se aproximava das dimensões mínimas daquela base. Esta opção surgiu como alternativa, tendo em consideração a variabilidade de formas e de tamanhos que caracteriza o fitoplâncton (Felip & Catalán, 2000), de forma a não sobrestimar os cálculos de biomassa para essas células, em particular (Harrison *et al.*, 2015).

Ao longo de todo o estudo, procurou-se equilibrar a precisão analítica com a viabilidade do trabalho, reduzindo o esforço de medição sem comprometer a

qualidade dos resultados. Esta abordagem considerou o tempo envolvido em cada determinação por microscopia ótica e o número de dimensões requeridas.

A microscopia ótica permite medir apenas duas dimensões. No entanto, para certas formas geométricas é necessária uma terceira dimensão (altura ou espessura), cuja obtenção é limitada, sobretudo em amostras preservadas. Nestes casos, a altura foi estimada com base na largura, assumindo proporcionalidade entre ambas, conforme sugerido por Verity *et al.* (1992). Segundo os mesmos autores, essa aproximação é adequada para células com menos de 20  $\mu\text{m}$ , podendo ser tratadas como esferoides prolatas. Esta abordagem também foi adotada por Cornet-Barthaux *et al.* (2007) e Vadrucchi *et al.* (2013).

A abundância de cada táxon foi calculada em células por litro ( $\text{cél. L}^{-1}$ ), com base nas subamostras de 50 mL. Com estes dados e com os valores médios de biovolume de cada táxon, foi calculada a biomassa de cada táxon, em  $\mu\text{g C L}^{-1}$  (Edler & Elbrächter, 2010). Para converter o biovolume em conteúdo de carbono, foram aplicados os fatores de conversão propostos por Menden-Deuer & Lessard (2000): para as Diatomáceas:  $\text{pg C cél.}^{-1} = 0.288 \times \text{volume}^{0.811}$ , e para os Dinoflagelados:  $\text{pg C cél.}^{-1} = 0.216 \times \text{volume}^{0.939}$ . A biomassa total da amostra foi então expressa como a soma das biomassas dos táxons que foram contabilizados na respectiva amostra.

## II.5. Tratamento e análise estatística dos dados

Os dados foram processados e analisados com recurso aos *softwares* Microsoft Excel e R (R Core Team, 2024). As análises tiveram como objetivos principais: (i) explorar a estrutura das comunidades microfitorplanctónicas; (ii) testar as duas hipóteses formuladas; e (iii) avaliar relações entre parâmetros físico-químicos e espaciais (ilha/monte submarino e distância à costa). Todas as análises foram realizadas no ambiente R, com os pacotes *vegan* (Oksanen *et al.*, 2022), *ggplot2* (Wickham, Chang, *et al.*, 2023), *dplyr* (Wickham, François, *et al.*, 2023), *stats* (R Core Team, 2024), *Hmisc* (Harrell & Dupont, 2023), *FSA* (Ogle *et al.*, 2022), *dunn.test* (Dinno, 2017), *mice* (van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011) e *missMDA* (Josse & Husson, 2016), entre outros, para análise estatística, imputação, manipulação de dados e visualização gráfica.

Ao longo do presente trabalho, os valores numéricos são apresentados com ponto como separador decimal, seguindo o formato padrão dos *outputs* gerados no ambiente *R*.

A base de dados consolidada (Tabela B-I, Anexo B) inclui 31 estações e 1293 entradas taxonômicas, com variáveis biológicas (biomassa, abundância e biovolume), físico-químicas (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, MLD e nutrientes) e ambientais (profundidade da DCM, intensidade do vento e distância à costa), bem como espaciais (latitude, longitude) e temporais (data/hora de amostragem).

As distâncias entre as estações de amostragem e os respectivos pontos de referência (ilhas ou montes submarinos) foram medidas no *Google Earth Pro*, a partir de coordenadas georreferenciadas (Kaufmann *et al.*, 2020). Estas medições tiveram como objetivo avaliar o efeito da proximidade da costa na biomassa de carbono e na abundância da comunidade microfitoplanctônica, de acordo com a segunda hipótese nula formulada. Para o Banco Princesa Alice, o ponto de referência foi a parte central das estações amostradas. Já para o Banco das Formigas, o ponto de referência foi o Farol das Formigas. Para as restantes estações, a referência adotada foi a ilha mais próxima da estação amostrada.

### II.5.1. Estatística descritiva e análise de normalidade

A abundância microfitoplanctônica e a biomassa de carbono foram analisadas com recurso a estatísticas descritivas, incluindo a média, o desvio padrão, o intervalo de confiança, a mediana, a variância e a soma. A normalidade das distribuições foi avaliada através do teste de *Shapiro-Wilk* (Shapiro & Wilk, 1965). Este indicou ausência de normalidade tanto nos dados de abundância como nos de biomassa de carbono. Nas representações gráficas (por exemplo, *boxplots* e de barras), foram utilizados os dados brutos (não transformados). Contudo, para comparações estatísticas e modelações que assumem normalidade, os dados foram transformados utilizando o logaritmo de base 10, segundo a fórmula  $\log_{10}(x + 1)$ . Esta transformação teve como objetivos reduzir a assimetria, atenuar a influência de valores extremos e aproximar os dados a uma distribuição normal. Dado que os pressupostos de normalidade não foram satisfeitos, foram adotados testes estatísticos não paramétricos nas análises subsequentes.

## II.5.2. Tratamento de dados físico-químicos

As variáveis físico-químicas utilizadas neste estudo incluíram: temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, MLD, intensidade do vento, nutrientes ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ), profundidade da DCM e distância à costa.

Os nutrientes apresentaram 29% de dados ausentes. Para evitar a exclusão de amostras e preservar a integridade da matriz de dados, foi aplicada imputação multivariada por *Predictive Mean Matching* (PMM), na Correlação de *Spearman*, método recomendado por manter a variabilidade natural das distribuições (van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011). Para análises específicas, como a Análise de Componentes Principais (PCA), recorreu-se à imputação simples pela média de cada variável, de modo a garantir uma matriz completa, necessária para este tipo de análise. Para tal, utilizou-se o pacote *missMDA* (Josse & Husson, 2016) que aplica uma abordagem iterativa baseada em PCA, mais adequada à estrutura multivariada dos dados. Nas análises de regressão linear, a imputação dos dados ausentes foi realizada, igualmente, por substituição pela média de cada variável, mas de forma direta e não iterativa, por se tratar de uma abordagem simples e apropriada quando se pretende identificar tendências gerais, e não explorar a variabilidade estatística (Allison, 2002). Esta estratégia de imputação de dados permitiu manter todas as observações nas análises, evitando a perda de informação por exclusão de amostras com dados em falta.

## II.5.3. Análises multivariadas

Com o objetivo de explorar padrões na estrutura da comunidade microfitoplanctónica e a sua relação com parâmetros físico-químicos, foram aplicadas as seguintes técnicas multivariadas: PERMANOVA (*Permutational Multivariate Analysis of Variance*; Anderson, 2001) para testar diferenças na composição entre regiões (ilhas/montes) e entre categorias de distância ("Próximo" vs. "Afastado"). Análises pareadas e a PERMDISP (*Permutational Analysis of Multivariate Dispersions*; Anderson, 2006) complementaram a avaliação das diferenças na dispersão entre grupos. A técnica ordinal PCoA

(*Principal Coordinates Analysis*, baseada na dissimilaridade de *Bray-Curtis*; Gower, 1966) foi aplicada para representar, graficamente, as diferenças na estrutura da comunidade microfitoplanctónica.

A escolha do nível taxonómico da ordem permitiu uma abordagem equilibrada entre resolução ecológica e robustez estatística, capturando padrões de diversidade e diferenciação sem ser afetada por potenciais erros de identificação. Esta opção metodológica proporcionou uma visão abrangente da estrutura da comunidade, facilitando a visualização e a interpretação dos padrões espaciais.

A PCA (*Principal Component Analysis*; Hotelling, 1933; Pearson, 1901) foi aplicada para reduzir a dimensionalidade das variáveis físico-químicas, permitindo visualizar os eixos de maior variação associados à biomassa e à abundância e às diferentes regiões. A correlação de *Spearman* (Spearman, 1904) foi utilizada para explorar relações monotónicas entre variáveis físico-químicas e biológicas (biomassa e abundância).

Com o objetivo de identificar padrões de similaridade ecológica entre os locais de amostragem (ilhas e montes submarinos), foi realizada uma análise de agrupamento hierárquico, baseada na composição taxonómica do microfitoplâncton (ao nível da ordem), na biomassa de carbono e em parâmetros físico-químicos. As amostras foram, previamente, agrupadas por ilha ou monte submarino. A matriz de dados incluiu a abundância relativa das ordens de microfitoplâncton, a biomassa de carbono (após transformação) e os valores médios das variáveis físico-químicas (explicativas). Os valores ausentes foram imputados pela média da variável correspondente. Todos os dados foram padronizados utilizando o *z-score*. A dissimilaridade entre regiões foi calculada com base na distância euclidiana, e a ligação entre grupos foi efetuada através do método *Ward.D2*, apropriado para variáveis contínuas e para minimizar a variância intra-grupo. A estrutura dos agrupamentos foi representada, graficamente, num dendrograma, permitindo visualizar regiões com características ecológicas semelhantes.

De forma complementar, foram calculados três índices ecológicos com o objetivo de caracterizar a diversidade taxonómica do microfitoplâncton em diferentes contextos espaciais (por ilha/monte submarino e por categorias de distância “Próximo” e “Afastado”): o índice de diversidade de *Shannon* ( $H'$ )

(Shannon, 1948), a riqueza específica (S) e o índice de equidade de *Pielou* (J') (Pielou, 1966). Estes índices foram estimados individualmente para cada estação de amostragem, com base nas abundâncias relativas das espécies identificadas taxonomicamente, permitindo quantificar, respetivamente, a diversidade, o número de táxons presentes e a uniformidade da distribuição das abundâncias entre as espécies (Magurran, 2004). O cálculo dos índices H' e J' utilizou o logaritmo natural ( $\ln$ ) e foi realizado com a função *diversity()* do pacote *vegan*. Para garantir a precisão das estimativas, foram excluídas as categorias não resolvidas (UPOA, UPOB, UDino e UDiatom), correspondentes a grupos de microfitoplâncton. Esta decisão visou evitar a sobrevalorização artificial da diversidade, uma vez que a inclusão de unidades taxonómicas indeterminadas pode inflacionar o número efetivo de espécies e comprometer a fiabilidade ecológica da análise (Gotelli & Colwell, 2001). Apesar disso, essas categorias foram mantidas no registo geral da composição morfológica (Tabela B-I, Anexo B), uma vez que contribuem para a caracterização da estrutura geral da comunidade. Após o cálculo dos índices por estação, os valores foram agrupados de duas formas: por ilha ou monte submarino, e por categorias de distância à costa ("Próximo" e "Afastado"), definidas com base na mediana da distância ao ponto de referência costeiro. Esta abordagem permitiu comparar padrões de diversidade entre diferentes regiões geográficas e entre zonas ambientais mais costeiras e mais oceânicas, captando potenciais gradientes espaciais e variações estruturais associadas à insularidade ou à exposição ao oceano aberto. As comparações estatísticas entre grupos foram realizadas utilizando testes não paramétricos apropriados para dados que não seguem a distribuição normal (Gibbons & Chakraborti, 2011). No caso das ilhas e montes submarinos, foi aplicado o teste de *Kruskal-Wallis*, adequado para comparações entre múltiplos grupos independentes. Para as categorias de distância, foi utilizado o teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney*, mais indicado para dois grupos independentes. Ambos os testes foram conduzidos separadamente para os três índices (H', S e J'), permitindo avaliar diferenças estatisticamente significativas em cada métrica. Foram, também, gerados *boxplots* para visualizar a distribuição dos valores dos índices entre os grupos considerados.

#### II.5.4. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na comunidade microfitoplanctónica

Foram utilizadas duas abordagens principais: a PCoA, baseada na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis*, e a PERMANOVA.

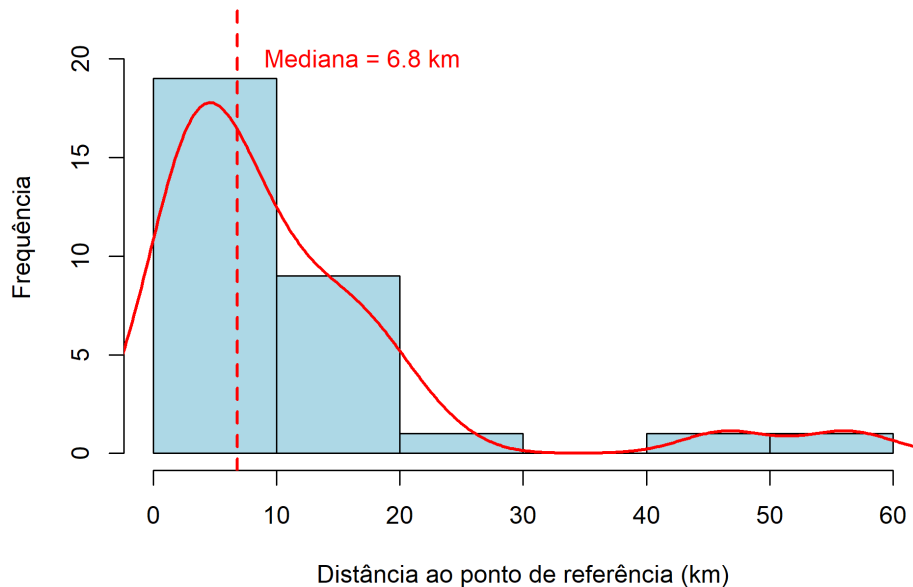
A PCoA, baseada na dissimilaridade de *Bray-Curtis* da composição taxonómica do microfitoplâncton, ao nível da ordem, foi aplicada, primeiramente, com abundâncias médias por região (ilha ou monte submarino), permitindo reduzir a influência de valores extremos e visualizar padrões gerais de semelhança entre regiões. Seguidamente, utilizou-se as abundâncias individuais por estação como variável base. Já a PERMANOVA foi aplicada aos dados individuais, preservando a variabilidade intra-regional e considerando cada amostra como uma unidade independente. Tendo a PERMANOVA global indicado diferenças, estatisticamente significativas, foram realizados testes *post hoc* (pareados) para identificar grupos regionais com diferenças significativas. A homogeneidade das dispersões entre grupos foi avaliada com PERMDISP. Todos os dados foram, previamente, padronizados por *z-score* para minimizar a influência de valores extremos nas análises.

#### II.5.5. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na biomassa de carbono

Para avaliar diferenças na biomassa microfitoplanctónica entre regiões (ilhas e montes submarinos), os dados foram agrupados pela variável *Ilha/Monte* da Tabela A-I (Anexo A), agrupando todas as estações amostradas dentro de cada unidade geográfica. A biomassa de carbono foi resumida pela média por ilha/monte submarino, de modo a padronizar os valores e evitar enviesamentos decorrentes do número desigual de estações por local. Esta abordagem permitiu manter a estrutura hierárquica dos dados e assegurar a comparabilidade entre regiões. A análise estatística foi realizada com o teste de *Kruskal-Wallis*, apropriado para dados não paramétricos. Identificadas diferenças significativas, aplicou-se o teste *post hoc* de *Dunn* com correção de *Holm*, para determinar quais os pares de regiões que apresentavam diferenças estatisticamente significativas.

## II.5.6. Avaliação da influência da distância à costa na comunidade microfitoplanctónica

Para categorizar as 31 estações em categorias de distância, foi analisada a distribuição dos dados, considerando a sua natureza, como *outliers*, assimetrias e a variação dos parâmetros ambientais. Com base nessa análise, optou-se por dividir as estações tendo em conta a mediana da distância (6.8 km) (Figura II-4) como critério de corte, em duas categorias de distância: "Próximo" ( $\leq 6.8$  km,  $n = 16$ ) e "Afastado" ( $> 6.8$  km,  $n = 15$ ). Outras abordagens, como intervalos percentuais ou agrupamento hierárquico, foram consideradas para definir os grupos de distância. No entanto, a mediana revelou-se a opção mais equilibrada, pois proporcionou uma separação objetiva das estações, sem ser excessivamente sensível a *outliers* ou assimetrias na distribuição dos dados. Além disso, permitiu uma categorização equitativa das estações amostradas, facilitando a comparação estatística e maximizando a deteção de possíveis variações ambientais relevantes. De facto, esta categorização pela mediana foi sustentada pela presença de gradientes ambientais (físico-químicos e biológicos) que distinguem os dois grupos de estações. As classificadas como "Próximo" apresentaram, em média, temperaturas mais elevadas, menor profundidade, menor concentração de oxigénio dissolvido e maior abundância microfitoplanctónica. Já as estações "Afastado" registaram, em média, águas mais frias, maiores profundidades, maior concentração de nutrientes ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ) e maior profundidade da camada de mistura (MLD). Estas diferenças sugerem que a distância à costa ou ao monte submarino está associada a gradientes físico-químicos e biológicos relevantes, conferindo validade ecológica à utilização da mediana como ponto de separação.



**Figura II-4:** Distribuição das distâncias das estações em relação às ilhas e montes submarinos. O histograma representa a frequência das distâncias (em km) das estações ao ponto de referência, enquanto a linha vermelha indica a densidade estimada dos dados. A linha vermelha tracejada assinala a mediana da distância (6.8 km), utilizada para categorizar as estações amostradas em “Próximo” ( $\leq 6.8$  km) e “Afastado” ( $> 6.8$  km).

Para analisar variações na composição taxonômica da comunidade microfitoplanctônica em função da distância à costa, foram aplicadas várias análises estatísticas multivariadas. Em primeiro lugar, foi realizada uma Análise de Coordenadas Principais (PCoA) baseada na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis*, utilizando as abundâncias das amostras individuais em cada categoria de distância (“Próximo” e “Afastado”), com o objetivo de visualizar potenciais padrões de separação entre os grupos. Esta análise foi efetuada ao nível taxonômico da ordem. Em seguida, foi realizada uma análise PERMANOVA com o objetivo de testar se as diferenças na composição da comunidade, ao nível taxonômico da ordem, entre as categorias de distância eram estatisticamente significativas.

#### II.5.7. Avaliação da influência da distância à costa na biomassa de carbono

Para avaliar se a biomassa microfitoplanctônica difere significativamente entre as duas categorias de distância (“Próximo” e “Afastado”), foi aplicado o teste de *Wilcoxon Rank-Sum*. Este teste não paramétrico, implementado através

da função *wilcox.test()*, foi escolhido por ser robusto a distribuições não normais e à presença de *outliers*, o que era o caso dos dados deste estudo.

#### II.5.8. Relações entre a abundância, a biomassa de carbono e os parâmetros físico-químicos

Para avaliar as relações entre as variáveis biológicas (abundância e a biomassa microfitoplanctônicas) e as variáveis físico-químicas, foram aplicadas a correlação de *Spearman* e PCA. As variáveis consideradas incluíram biomassa, abundância, temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, MLD, intensidade do vento, profundidade, distância à costa e as concentrações de  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . A biomassa e a abundância foram transformadas para reduzir a assimetria e a influência de *outliers*, enquanto as restantes variáveis foram mantidas sem transformação.

Para avaliar relações não lineares, utilizou-se a correlação de *Spearman* com dados transformados e imputação multivariada através do método de correspondência por média preditiva (*Predictive Mean Matching*, método "pmm"), implementado no pacote *mice*.

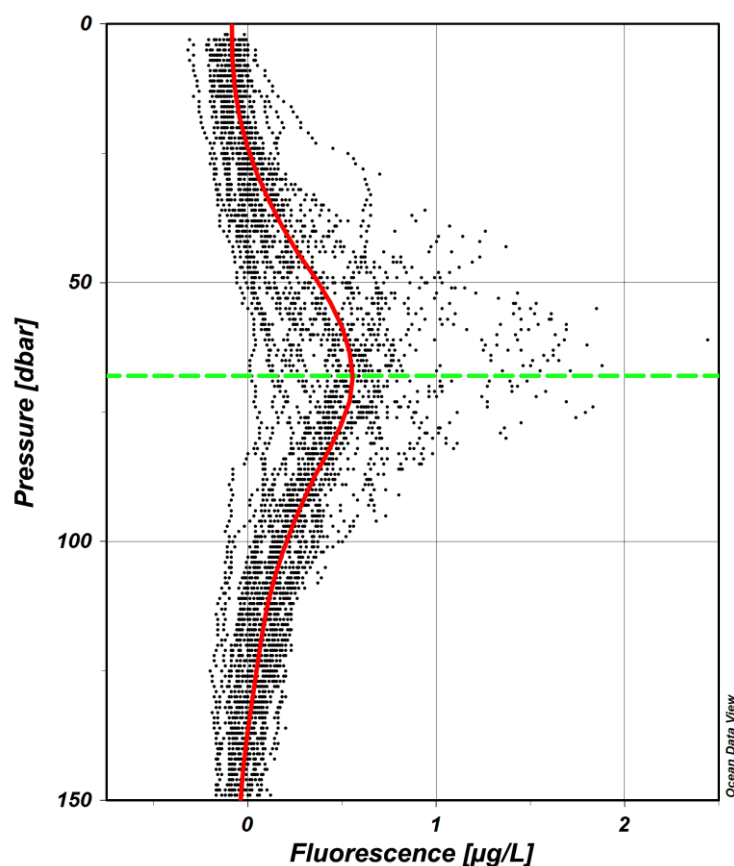
Posteriormente, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA), com padronização *z-score* e imputação dos dados ausentes dos nutrientes com o método *Regularized* do pacote *missMDA*, de modo a identificar gradientes ambientais associados à biomassa e abundância e a explorar padrões multivariados nas variáveis físico-químicas e biológicas. A mesma análise foi aplicada para identificação dos gradientes ambientais associados às ilhas e montes e às categorias de distância.

Regressões lineares simples foram aplicadas, individualmente, a cada variável preditora, utilizando a função *lm()* no *R*, para verificar tendências entre os parâmetros ambientais e físico-químicos e as regiões (ilhas e montes submarinos) e as categorias de distância. Foram avaliados o coeficiente de regressão, o  $R^2$  e o *p*-valor (com significância para  $p < 0.05$ ).

### III. Resultados

#### III.1. Caracterização dos parâmetros físico-químicos por ilha/monte submarino e por distância à costa

Os parâmetros físico-químicos analisados correspondem aos obtidos à profundidade da DCM, para cada uma das 31 amostras de água, tendo-se verificado que, na maioria das estações de amostragem, esta foi de 65 m (Figura III-1).



**Figura III-1:** Perfil de fluorescência de clorofila *a* em função da pressão (*dbar*) para todas as estações em estudo. A fluorescência foi medida com um sensor *WET LABS*, modelo *ECO-FL-NTU*, com uma sensibilidade de  $0.025 \text{ mg m}^{-3}$ . Cada ponto preto representa uma medição individual de fluorescência. A linha vermelha corresponde à média suavizada dos valores ao longo da coluna de água. A linha tracejada verde assinala a profundidade média (~65 m) onde se registaram os valores máximos de fluorescência, indicando a presença de uma camada subsuperficial rica em clorofila *a*.

A análise destes dados (Tabela C-I, Anexo C; Figura III-2), revelou padrões distintos entre as ilhas e os montes submarinos dos Açores.

A temperatura da água apresentou uma média de 18.36 °C, variando entre 16.84 °C e 20.46 °C, com desvio padrão de  $\pm 1.07$  °C. A Terceira evidenciou-se com as temperaturas mais elevadas e maior amplitude térmica, ao passo que Flores, Princesa Alice, Santa Maria e Formigas apresentaram valores mais baixos e relativamente homogêneos, tendo Flores a temperatura média mais baixa (Figura III-2).

A salinidade manteve-se estável, com média de 36.21 PSU e baixa variabilidade ( $\pm 0.053$ ). Notaram-se ligeiras diferenças regionais: valores um pouco mais baixos em Flores, e valores mais elevados e estáveis em Santa Maria e Formigas, com maior dispersão no Banco Princesa Alice.

O oxigénio dissolvido apresentou uma média de 238.49  $\mu\text{mol/kg}$ , com intervalo entre 226.16 e 252.23  $\mu\text{mol/kg}$ . Destacou-se o Banco Princesa Alice com as concentrações mais baixas e menos dispersas, em comparação com os valores mais elevados no Banco das Formigas e na ilha das Flores, onde também se verificou maior variabilidade. Na ilha da Terceira observaram-se valores relativamente heterogêneos.

A velocidade média do vento situou-se em 5.69 m/s, com dispersão considerável ( $\pm 3.27$ ), sendo os valores mais elevados observados na ilha das Flores e Formigas, e os mais baixos no Banco Princesa Alice.

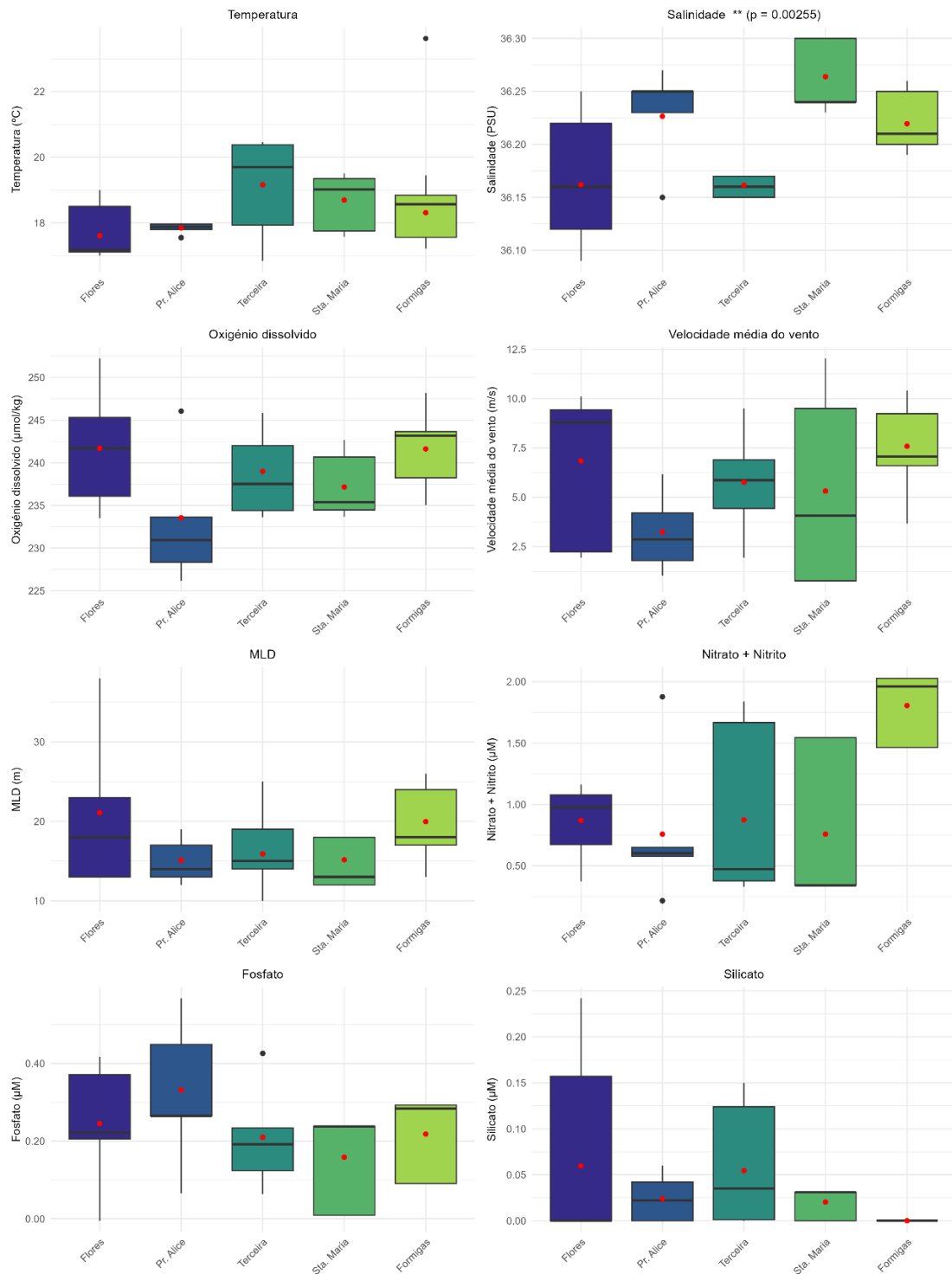
A profundidade média da camada de mistura (MLD) foi de 17.23 m, com intervalo de 10 a 38 m. Formigas e Flores apresentaram as MLD mais profundas, enquanto as restantes localidades registaram valores mais homogêneos e inferiores.

No que respeita aos nutrientes, os silicatos ( $\text{Si(OH)}_4$ ) apresentaram uma média muito baixa (0.04  $\mu\text{M}$ ), mas com alguma variação: Flores registou os valores mais altos e dispersos, enquanto Santa Maria e Formigas apresentaram concentrações praticamente nulas. Terceira e Princesa Alice revelaram níveis intermédios e mais estáveis.

Os nitratos + nitritos ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ) registaram uma média de 0.98  $\mu\text{M}$ , mas com elevada heterogeneidade: valores mais baixos em Flores e Princesa Alice, níveis mais consistentes e elevados em Formigas, e ampla dispersão na Terceira.

Por fim, os fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) apresentaram uma média de 0.24  $\mu\text{M}$ , com maior dispersão no Banco Princesa Alice. Santa Maria, Flores e Formigas

mantiveram valores moderados e relativamente estáveis, enquanto a Terceira apresentou uma tendência para concentrações mais baixas de nutrientes, embora com alguma sobreposição com os restantes locais, sugerindo diferenças subtis mais do que contrastes evidentes.



**Figura III-2:** Distribuição dos parâmetros físico-químicos e de nutrientes por ilha e monte submarino. Os *boxplots* representam a variação da temperatura (°C), salinidade (unidade prática de salinidade, PSU), oxigênio dissolvido (µmol/kg), profundidade da camada de mistura (MLD, m) e velocidade média do vento (m/s), e as concentrações de nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ , µM), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ , µM) e silicato ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ , µM) nas localidades de Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas. A linha preta central representa a mediana; as extremidades da caixa correspondem ao primeiro e terceiro quartis. Os pontos vermelhos representam a média aritmética. Pontos isolados fora das caixas indicam valores extremos (*outliers*). Foi identificada diferença estatisticamente significativa entre regiões apenas para o parâmetro da salinidade ( $p = 0.00255$ ), sinalizada no respetivo gráfico com dois asteriscos.

De acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* que avalia se as distribuições dos parâmetros variam significativamente entre as ilhas e montes submarinos apenas a salinidade apresentou uma diferença significativa ( $p = 0.00255$ ), sugerindo variações reais entre os grupos, apesar de esta ter apresentado uma baixa variabilidade absoluta (média de 36.21 PSU;  $\pm 0.053$ ). Este resultado indica que, embora os valores de salinidade sejam próximos, as variações regionais são consistentes e suficientemente sistemáticas para distinguir os grupos amostrados. Para os restantes parâmetros — temperatura ( $p = 0.153$ ), oxigénio dissolvido ( $p = 0.174$ ), nitrato + nitrito ( $p = 0.185$ ) e fosfato ( $p = 0.546$ ) — não se observou significância estatística, indicando que as suas distribuições são semelhantes entre as ilhas. Estes resultados destacam que, apesar da variabilidade geográfica, a salinidade é o único parâmetro que difere estatisticamente entre as localizações amostradas (Tabela C-II – Anexo C).

A análise dos dados ambientais obtidos à profundidade correspondente à DCM nas 31 estações amostradas (Tabela C-III, Anexo C; Figura III-3) revelou padrões distintos entre as categorias de distância ("Próximo" e "Afastado").

As estações classificadas como "Próximo" apresentaram temperaturas médias mais elevadas (18.96 °C) e maior dispersão dos valores, em contraste com as estações "Afastado", que registaram valores médios mais baixos (17.72 °C) e menor variabilidade. A salinidade manteve-se relativamente constante entre os grupos, com médias próximas (36.22 PSU em "Próximo" e 36.19 PSU em "Afastado"), embora com uma ligeira maior variabilidade nas estações mais afastadas.

Em termos de oxigénio dissolvido, observou-se uma média superior nas estações afastadas (240.95  $\mu\text{mol/kg}$ ) relativamente às próximas (236.18  $\mu\text{mol/kg}$ ).

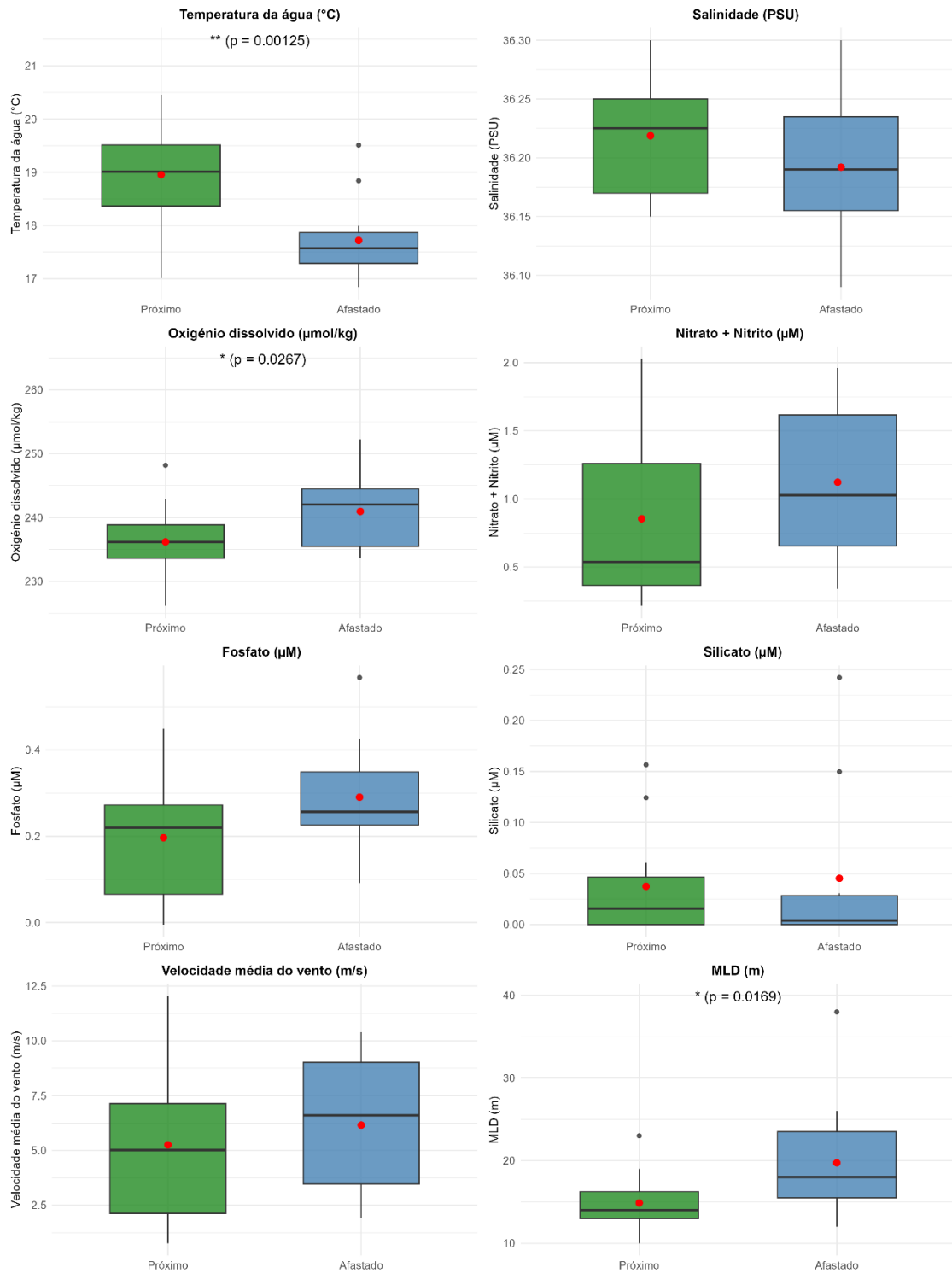
As concentrações de nutrientes também foram, em geral, mais elevadas nas estações afastadas: nitrato + nitrito atingiu uma média de 1.12  $\mu\text{M}$  ("Afastado") em comparação com 0.86  $\mu\text{M}$  ("Próximo"), e o fosfato apresentou 0.29  $\mu\text{M}$  contra 0.20  $\mu\text{M}$ . O silicato revelou-se baixo em ambas as categorias, mas com grande variabilidade, especialmente, nas estações afastadas.

A velocidade média do vento foi ligeiramente superior nas estações afastadas (6.15 m/s vs. 5.25 m/s). Finalmente, a profundidade da camada de mistura

(MLD) foi também mais elevada nas estações afastadas (média de 19.73 m), em comparação com as próximas (14.88 m).

Em resumo, observa-se que as estações mais próximas apresentam, em média, temperaturas mais elevadas, menor MLD e menores concentrações de nutrientes e oxigénio dissolvido. As estações mais afastadas tendem a apresentar valores superiores destes parâmetros.

A análise estatística com o teste *Wilcoxon*, aplicado aos parâmetros físico-químicos comparando as estações classificadas como “Próximo” e “Afastado” em relação à linha costeira revelou diferenças significativas em algumas variáveis. A temperatura da água foi significativamente mais elevada nas estações próximas ( $p = 0.001$ ), enquanto a profundidade da camada de mistura (MLD) foi superior nas estações mais afastadas ( $p = 0.017$ ). Verificou-se ainda uma diferença significativa na concentração de oxigénio dissolvido, com valores mais altos nas estações afastadas ( $p = 0.027$ ). Por outro lado, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas para os nutrientes fosfato ( $p = 0.176$ ), nitrato + nitrito ( $p = 0.235$ ), silicato ( $p = 0.703$ ), nem para a salinidade ( $p = 0.148$ ) e velocidade média do vento ( $p = 0.343$ ), ainda que algumas dessas variáveis apresentem tendências diferenciadas entre as categorias (Tabela C-IV, Anexo C).



**Figura III-3:** Distribuição dos parâmetros físico-químicos e nutrientes por categorias de distância ("Próximo" e "Afastado"). Os *boxplots* representam os valores de temperatura da água (°C), salinidade prática (PSU), oxigênio dissolvido (µmol/kg), nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) e silicato ( $\text{Si}((\text{OH})_4)$ ) (todos em µM), velocidade média do vento (m/s) e profundidade da camada de mistura (MLD, em metros), medidos nas 31 estações amostradas. Em cada gráfico, a mediana é representada pela linha horizontal dentro da caixa, os limites da caixa correspondem ao intervalo interquartil (25.º–75.º percentil), os extremos (bigodes) indicam a variação excluindo valores atípicos, e o ponto vermelho assinala a média. Pontos isolados fora das caixas indicam valores extremos (*outliers*). A presença de diferenças estatisticamente significativas entre as categorias de distância é assinalada com asteriscos, acompanhados do respetivo valor de *p*.

### III.2. Abundância, composição da comunidade microfitoplanctónica e biomassa de carbono presente nas amostras

A média e o desvio padrão da abundância no conjunto das amostras foram de 15 487 cél. L<sup>-1</sup> e de 8748 cél. L<sup>-1</sup>, respetivamente. Já a média da biomassa total foi de 10.4 µg C L<sup>-1</sup> e o desvio padrão de 9.6 µg C L<sup>-1</sup>.

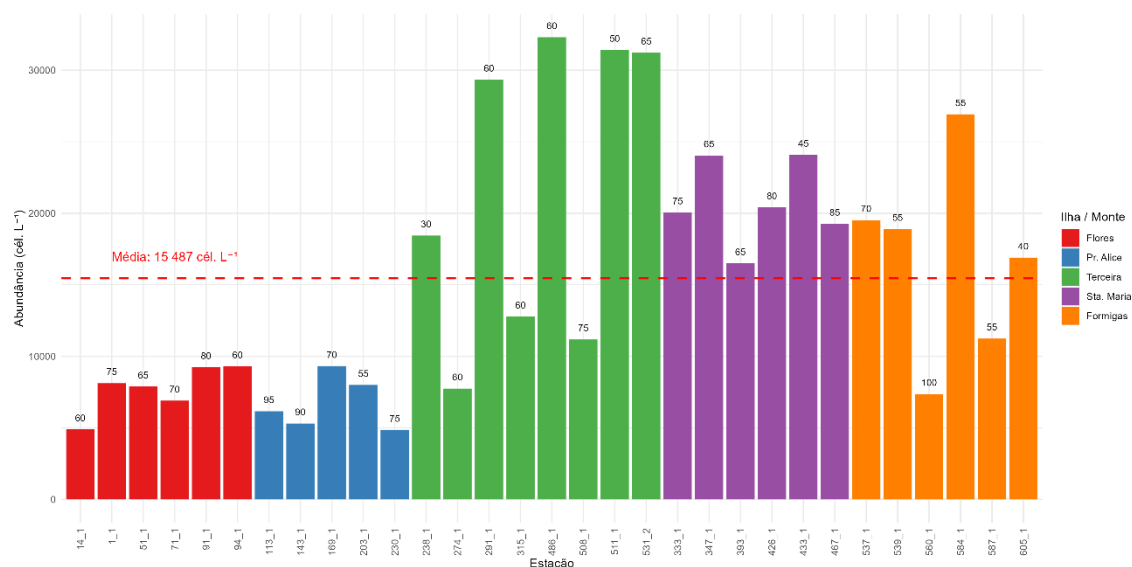
Da estatística descritiva dos dados obtidos na província biogeoquímica do NAST, que inclui zonas oligotróficas, verificou-se uma grande variabilidade, tanto na abundância quanto na biomassa de carbono, confirmada pelos altos desvios padrão (8748 cél. L<sup>-1</sup> para a abundância e 9.6 µg C L<sup>-1</sup> para a biomassa), indicando dispersão significativa dos valores. Com medianas menores que as médias, os dados possuem uma assimetria positiva, com alguns valores muito elevados que aumentam a média e o desvio padrão: a mediana da abundância (12 780 cél. L<sup>-1</sup>) e da biomassa (6.1 µg C L<sup>-1</sup>) são menores que suas médias (15 487 cél. L<sup>-1</sup> e 10.4 µg C L<sup>-1</sup>, respetivamente) (Tabela III-1).

**Tabela III-1:** Estatísticas descritivas da abundância e da biomassa de carbono no total das estações amostradas. Valores médios, desvio padrão, mediana, mínimo, máximo, variância, soma e intervalos de confiança para a abundância (cél. L<sup>-1</sup>) e biomassa de carbono (µg C L<sup>-1</sup>) obtidos na província biogeoquímica do Giro Subtropical do Atlântico Norte Oriental (NAST).

<b>Estatística</b>	<b>Abundância (cél. L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biomassa de Carbono (µg C L<sup>-1</sup>)</b>
Média	15 487	10.4
Desvio padrão	8748	9.6
Mediana	12 780	6.1
Mínimo	4860	1.1
Máximo	32 300	32.1
Variância	76 527 996	92.2
Soma	479 600	322.8
Intervalo de confiança (inferior)	12 262	6.9
Intervalo de confiança (superior)	18 680	13.9

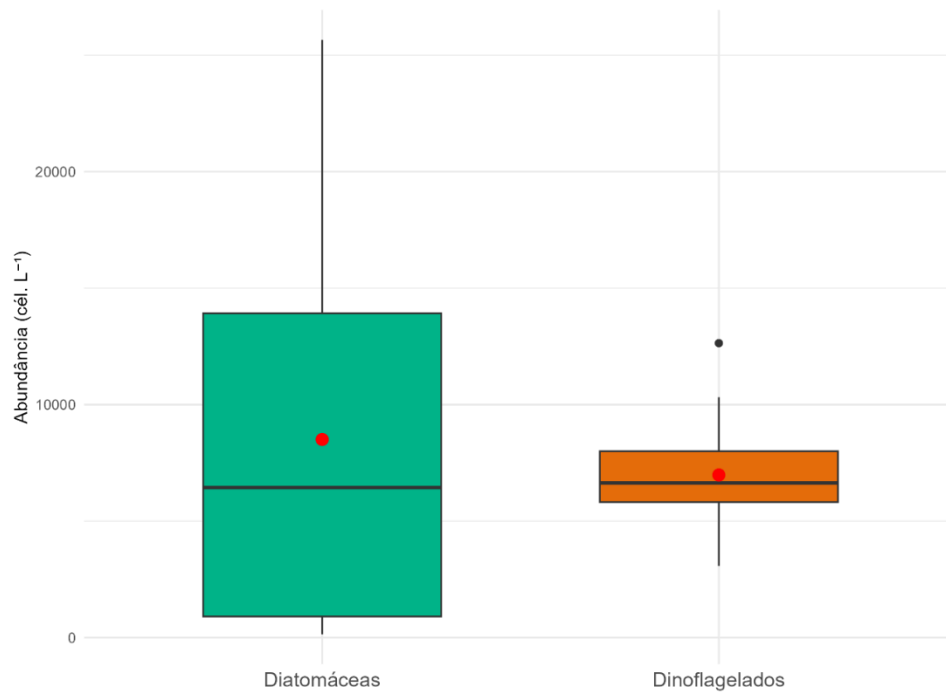
A abundância de células microfitoplanctónicas (cél. L<sup>-1</sup>) variou muito entre as estações amostradas. As maiores concentrações foram observadas nas estações associadas às ilhas da Terceira e Santa Maria e ao Banco das

Formigas. Os valores mais baixos ocorreram nas estações da ilha das Flores e do Banco Princesa Alice (Figura III-4).

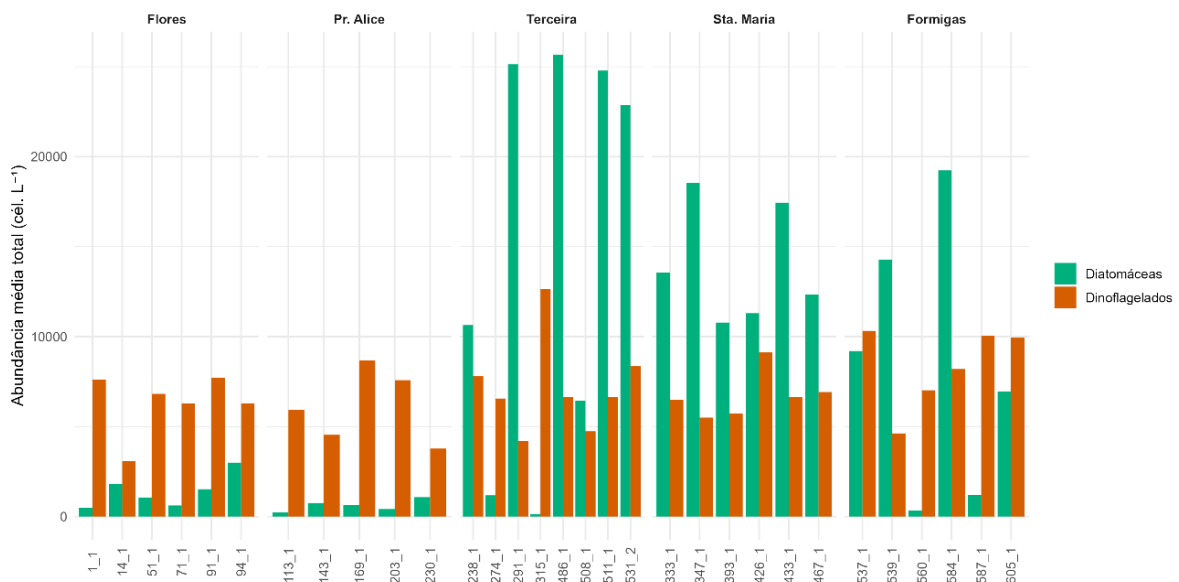


**Figura III-4:** Abundância de células microfitoplanctônicas por estação. As barras representam o número total de células por litro (cél. L<sup>-1</sup>) em cada estação amostrada, com a indicação da profundidade sobre cada barra. As estações estão agrupadas por ilha ou monte (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas) localizados na província biogeoquímica do Giro Subtropical do Atlântico Norte Oriental (NAST). A linha tracejada vermelha indica a média total de abundância (15 487 células L<sup>-1</sup>).

As Figuras III-5 e III-6 apresentam, respetivamente, a distribuição da abundância total e a abundância média por estação dos dois principais grupos de microfitoplâncton — diatomáceas e dinoflagelados (amostrados no NAST). De uma forma geral, observa-se uma dominância das diatomáceas, com abundância média visivelmente superior à dos dinoflagelados. A distribuição das diatomáceas revela também maior variabilidade, com valores máximos mais elevados e uma maior dispersão, em contraste com os dinoflagelados, cuja distribuição é mais concentrada e inclui um valor extremo isolado (Figura III-5). A análise por estação (Figura III-6) mostra que essa dominância se verifica na maioria das áreas amostradas, em particular para as estações associadas à ilha da Terceira, onde se registaram os valores mais elevados de abundância média de diatomáceas. Em contraste, os dinoflagelados apresentaram valores mais baixos e relativamente uniformes ao longo das estações. No entanto, nas estações correspondentes à ilha das Flores e ao Banco Princesa Alice, os dinoflagelados registaram valores médios de abundância superiores aos das diatomáceas, sendo o grupo dominante nessas regiões.

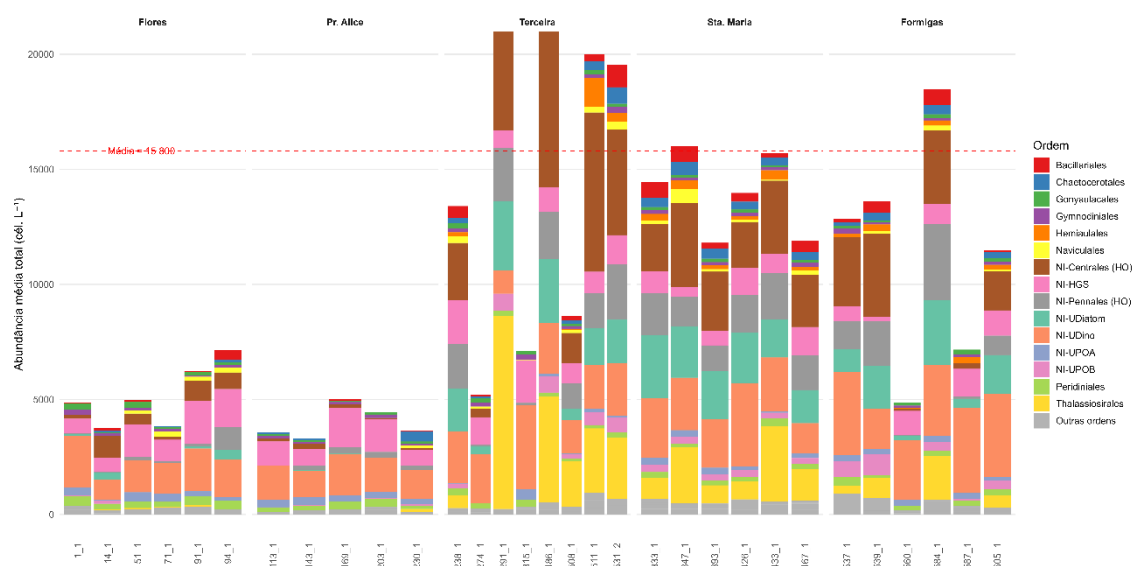


**Figura III-5:** *Boxplot* que representa a distribuição da abundância (células  $L^{-1}$ ) dos grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) no conjunto das estações amostradas. A linha horizontal no interior de cada caixa corresponde à mediana. Os limites da caixa indicam o primeiro e o terceiro quartis, enquanto os bigodes se estendem até 1.5 vezes o intervalo interquartil. Pontos isolados fora dos bigodes representam valores atípicos (*outliers*). A média de cada grupo encontra-se assinalada por um ponto vermelho.



**Figura III-6:** Abundância média de diatomáceas e dinoflagelados por estação de amostragem. As barras representam a abundância média (cél.  $L^{-1}$ ) dos dois principais grupos de microfitoplâncton — diatomáceas (a verde) e dinoflagelados (a laranja) — em cada estação amostrada. As estações estão organizadas segundo a ilha ou monte submarino a que pertencem (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas).

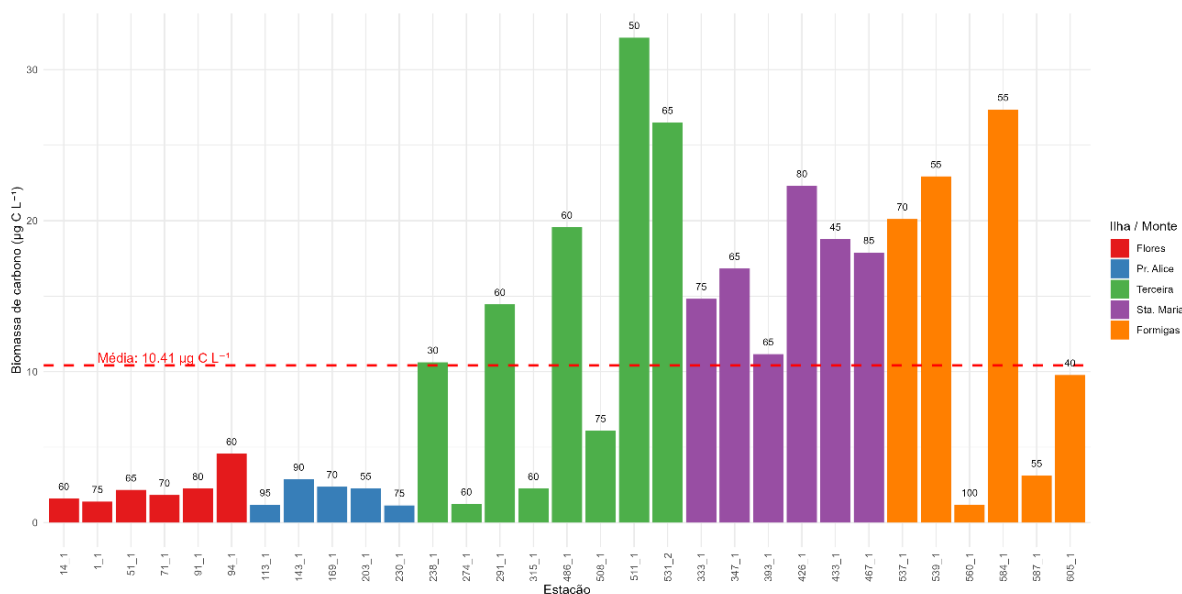
A Figura III-7 apresenta a abundância média das principais ordens taxonómicas de microfitoplâncton identificadas em cada estação amostrada na província biogeoquímica do NAST. De um modo geral, a composição taxonómica do microfitoplâncton variou entre as diferentes regiões. Na ilha da Terceira, registaram-se as maiores abundâncias médias totais, com predominância das ordens Centrales e Thalassiosirales, seguidas por outras como NI-UDiatom. Estas ordens também se destacaram em estações da ilha de Santa Maria e do Banco das Formigas, embora com menor intensidade. Pelo contrário, as estações associadas às ilhas das Flores e ao Banco da Princesa Alice mostraram abundâncias médias mais reduzidas e uma distribuição mais equilibrada entre as ordens e as categorias taxonómicas, como as Peridinales, NI-HGS e NI-UDino. Algumas ordens menos representativas, como Gonyaulacales, apresentaram valores baixos e distribuição localizada.



**Figura III-7:** Abundância média total de microfitoplâncton por estação de amostragem (cél. L<sup>-1</sup>), discriminada por ordem taxonómica. As barras representam a abundância média de cada ordem em cada estação, permitindo visualizar a composição relativa dos principais grupos. Estão incluídas as ordens dominantes de diatomáceas, dinoflagelados e categorias não identificadas (NI). A linha tracejada vermelha indica a média global da abundância média total por estação (≈ 15 800 células L<sup>-1</sup>), facilitando a identificação das estações com valores acima ou abaixo deste valor de referência.

Os dados de biomassa de carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) evidenciam variação acentuada entre estações e profundidades (Figura III-8). Observam-se valores mais elevados nas estações localizadas nas ilhas da Terceira, de Santa Maria e

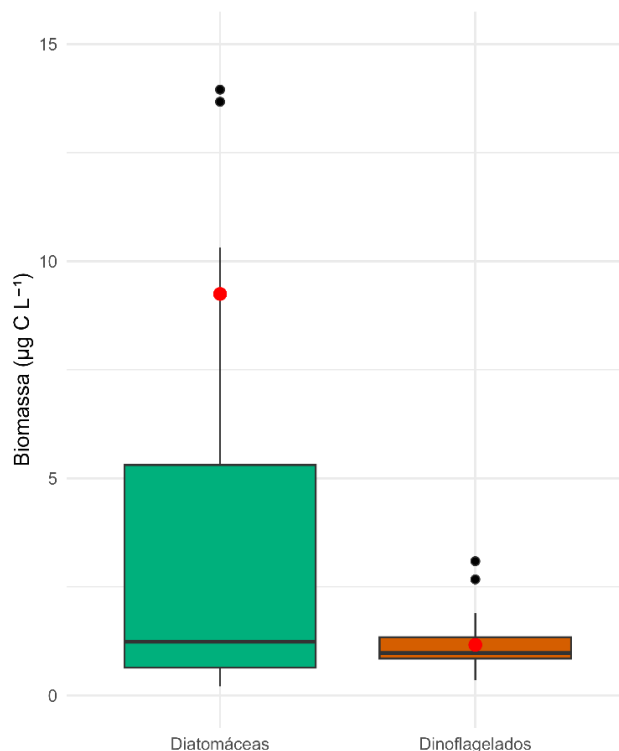
do Banco das Formigas, especialmente, em profundidades intermédias (50–85 m). Pelo contrário, as estações nas ilhas das Flores e do Banco Princesa Alice apresentam, em geral, valores inferiores.



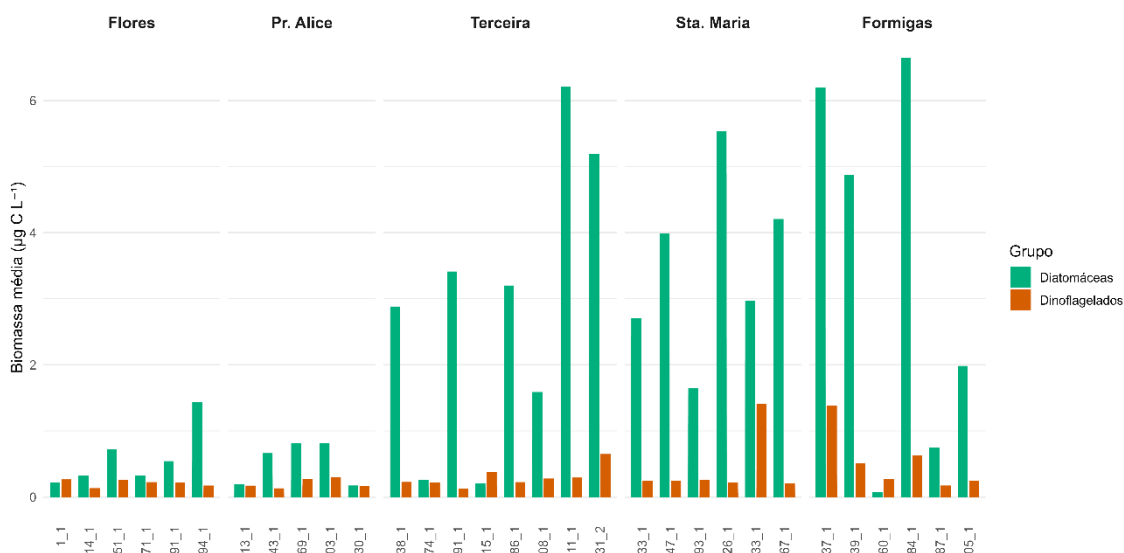
**Figura III-8:** Biomassa de carbono por estação e profundidade. As barras representam a biomassa de carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) do microfitoplâncton em cada estação amostrada, com indicação da profundidade sobre cada barra. As estações estão organizadas segundo a ilha ou monte a que pertencem. A linha tracejada vermelha indica a média global da biomassa ( $10.41 \mu\text{g C L}^{-1}$ ), permitindo comparar os valores entre as diferentes estações e profundidades.

As Figuras III-9 e III-10 revelam a dominância das diatomáceas em relação aos dinoflagelados na distribuição da biomassa de carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) do microfitoplâncton na província do NAST. A Figura III-9 mostra a distribuição geral da biomassa por grupo, enquanto a Figura III-10 representa a variação da biomassa média por estação. No geral, a biomassa média das diatomáceas revelou-se bem superior à dos dinoflagelados, apontando para uma contribuição bastante mais elevada deste grupo para o carbono microfitoplanctónico total.

Este padrão foi observado de forma regular ao longo das diferentes estações amostradas (Figura III-10), com valores particularmente elevados de biomassa média de diatomáceas nas estações da ilha da Terceira e de Santa Maria e no Banco das Formigas. Pelo contrário, os dinoflagelados apresentaram valores médios de biomassa bastante inferiores e relativamente uniformes entre estações, sem picos expressivos.

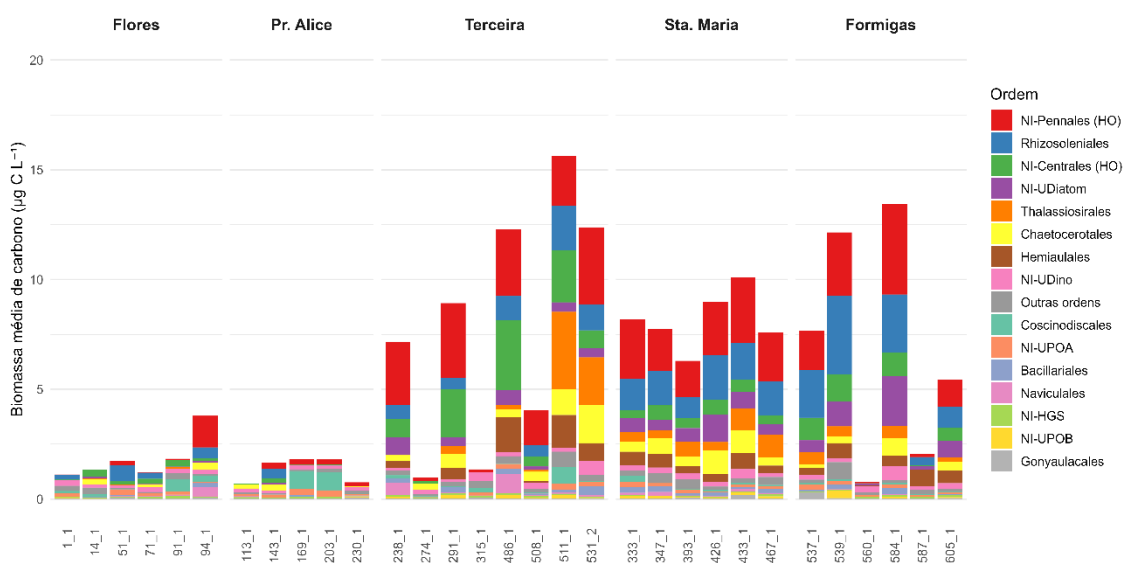


**Figura III-9:** *Boxplot* da biomassa ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) dos dois principais grupos de microfítoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) no conjunto das estações amostradas. A linha horizontal no interior de cada caixa representa a mediana, enquanto os limites superior e inferior da caixa correspondem ao terceiro e ao primeiro quartil, respetivamente. Os bigodes estendem-se até 1.5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos acima representam valores atípicos. A média de cada grupo está assinalada com um ponto vermelho. Observa-se que, no caso das diatomáceas, a média encontra-se acima do terceiro quartil, refletindo a influência de valores extremos elevados e uma distribuição assimétrica positiva.



**Figura III-10:** Biomassa média de carbono de diatomáceas e dinoflagelados por estação. As barras representam os valores médios de biomassa de carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) dos dois principais grupos de microfítoplâncton — diatomáceas (a verde) e dinoflagelados (a laranja) — em cada estação amostrada. As estações estão organizadas de acordo com a ilha ou monte a que pertencem (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas).

A Figura III-11 apresenta a biomassa média de carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) das diferentes ordens de microfitoplâncton identificadas em cada estação amostrada, organizadas por ilha ou monte no NAST. Os dados revelam uma evidente dominância de ordens pertencentes ao grupo das diatomáceas, como Chaetocerales, Rhizosoleniales, Pennales e Centrales, que se destacam como principais contribuidoras para a biomassa total nas estações da Terceira, Santa Maria e das Formigas. Embora a biomassa total seja dominada por diatomáceas, observam-se também contribuições relevantes de dinoflagelados, em particular das ordens Gonyaulacales e da categoria NI-UDino, presentes em várias estações, em particular, para Flores, Santa Maria e Formigas. A diversidade taxonômica representada pelas barras de diferentes cores empilhadas mostra variações na composição entre as estações, com maior complexidade estrutural da comunidade nas estações com maior biomassa total.

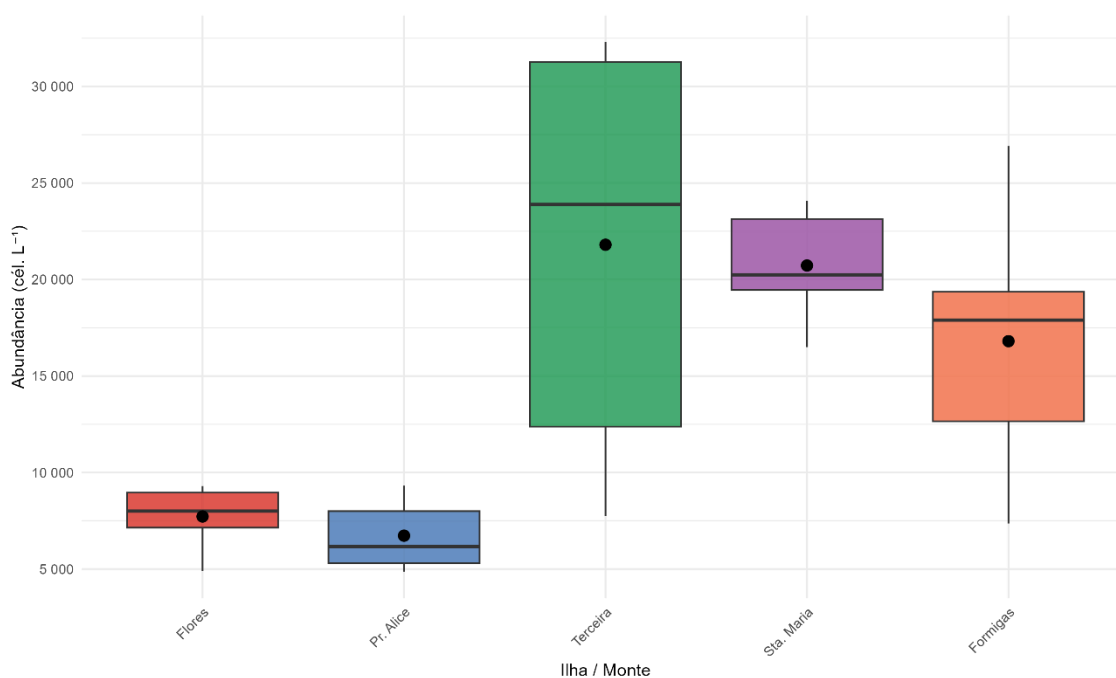


**Figura III-11:** Biomassa média de carbono por ordem de microfitoplâncton, por estação. As barras empilhadas representam a biomassa média de carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) das 15 categorias taxonômicas de microfitoplâncton identificadas, ao nível da ordem, em cada estação que contribuem com maior biomassa média. As estações estão organizadas de acordo com a ilha ou monte a que pertencem (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas). Cada cor representa uma ordem distinta, permitindo visualizar a contribuição relativa de cada grupo para a biomassa total.

### III.3. Abundância, composição da comunidade microfitoplanctónica e biomassa de carbono nas ilhas e montes submarinos

Para analisar a distribuição e composição da comunidade microfitoplanctónica entre as ilhas e montes submarinos, foi produzida uma série de representações gráficas (Figuras III-12 a III-14).

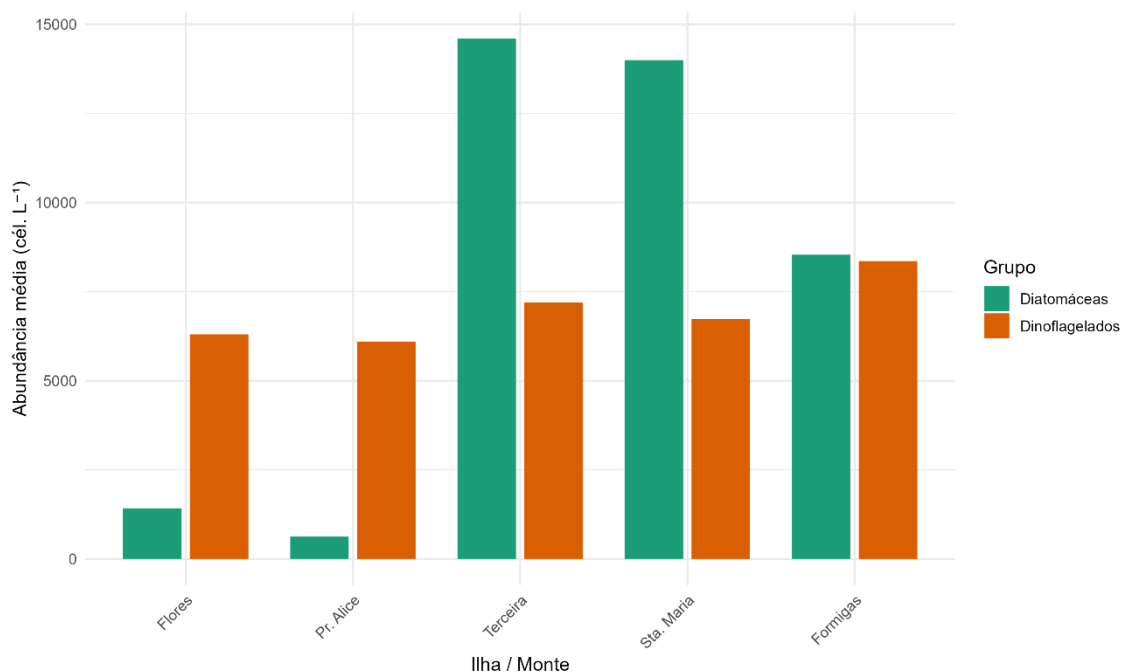
A Figura III-12 evidencia variações significativas na abundância celular de microfitoplâncton entre as diferentes áreas amostradas na região do NAST. A ilha da Terceira destacou-se com os valores mais elevados e maior variabilidade. Santa Maria e o Banco das Formigas apresentaram abundâncias também elevadas, mas mais consistentes. Já a ilha das Flores e o Banco Princesa Alice revelaram abundâncias celulares mais baixas e menor dispersão dos dados.



**Figura III-12:** Abundância microfitoplanctónica por ilha/monte. O gráfico representa a distribuição da abundância de microfitoplâncton (cél. L<sup>-1</sup>) nas diferentes ilhas e montes da província biogeoquímica do Giro Subtropical do Atlântico Norte Oriental (NAST). As caixas mostram os valores interquartis (Q1–Q3), a linha horizontal marca a mediana e os pontos pretos representam as médias.

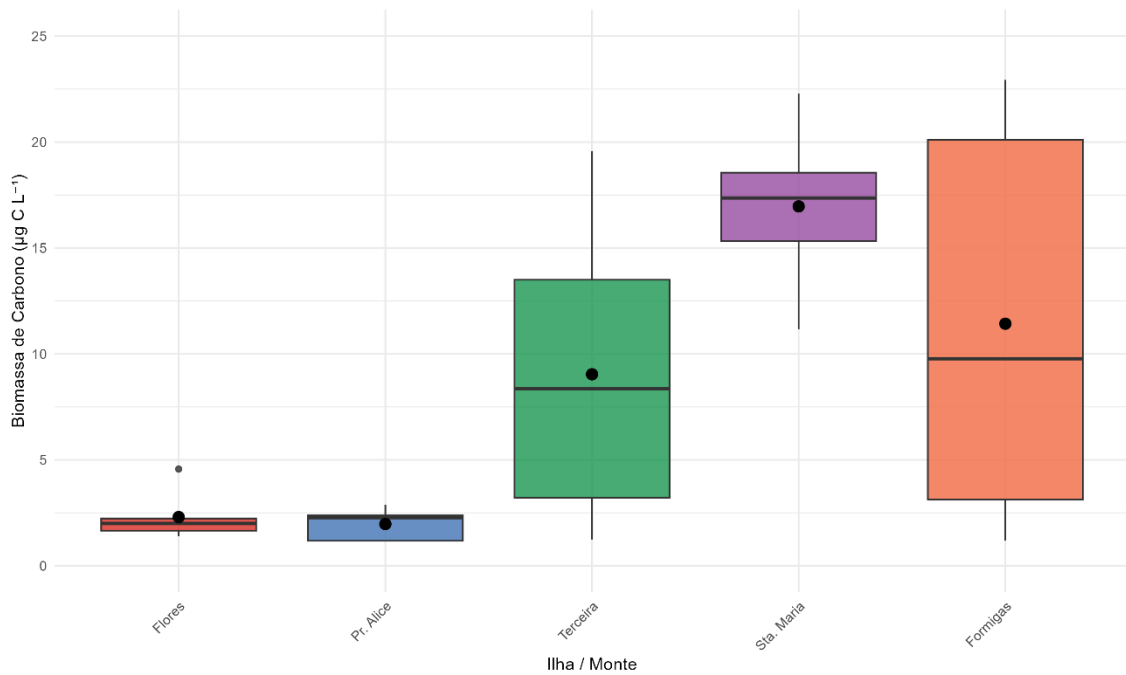
A Figura III-13 apresenta a abundância média dos dois principais grupos taxonómicos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) por ilha e monte submarino. Verifica-se uma variação espacial na composição da comunidade. Em locais como as Flores e a Princesa Alice, os dinoflagelados são o grupo dominante. Por outro lado, nas ilhas da Terceira e de Santa Maria,

observa-se uma predominância das diatomáceas. No Banco das Formigas, a composição surge mais equilibrada, com uma ligeira dominância das diatomáceas, sugerindo uma coexistência mais equitativa entre os dois grupos.



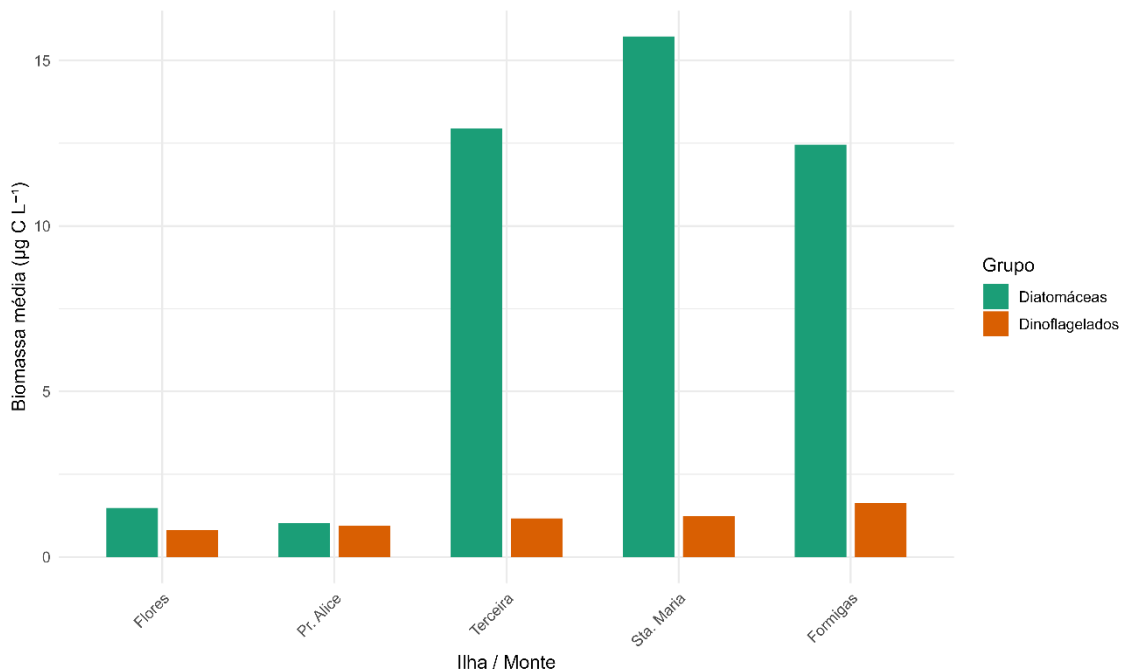
**Figura III-13:** Abundância média de diatomáceas e dinoflagelados por ilha/monte. As barras representam os valores médios de abundância celular (cél. L<sup>-1</sup>) dos dois principais grupos de microfitoplâncton — diatomáceas (a verde) e dinoflagelados (a laranja) — para cada local amostrado (Flores, Pr. Alice, Terceira, Sta. Maria e Formigas).

Na Figura III-14 analisa-se a contribuição relativa dos dois principais tipos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) para a biomassa total expressa em carbono ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ), em diferentes ilhas e montes submarinos dos Açores. A biomassa microfitoplanctónica apresentou variações notáveis entre as diferentes ilhas e montes submarinos. Os maiores valores médios de biomassa foram observados na ilha de Santa Maria ( $\sim 17.00 \mu\text{g C L}^{-1}$ ), na ilha da Terceira e no Banco das Formigas ( $\sim 14.00 \mu\text{g C L}^{-1}$ ), indicando condições favoráveis ao desenvolvimento microfitoplanctónico. Já a ilha das Flores ( $\sim 2.30 \mu\text{g C L}^{-1}$ ) e o monte submarino da Princesa Alice ( $\sim 1.97 \mu\text{g C L}^{-1}$ ) apresentaram os valores médios mais baixos, sugerindo condições menos favoráveis à acumulação de biomassa nestas áreas. Esta distribuição espacial da biomassa mostra um padrão crescente de oeste para leste, com os valores mais elevados concentrados nas regiões mais orientais do arquipélago.



**Figura III-14:** Distribuição da biomassa microfitoplanctónica ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) nas diferentes ilhas e montes submarinos. Os *boxplots* representam os valores mínimo, máximo, quartis e mediana da biomassa total, enquanto os pontos pretos indicam a média.

A Figura III-15 apresenta a biomassa média de carbono dos dois principais grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) por ilha e monte submarino dos Açores. Em todos os locais, observa-se que a biomassa média das diatomáceas é superior à dos dinoflagelados. Esta diferença é particularmente evidente na ilha de Santa Maria, no Banco da Formigas e na Terceira, onde os valores de biomassa das diatomáceas atingem os níveis mais elevados entre os locais analisados. No extremo oposto, os menores valores de biomassa são observados na ilha das Flores e no Banco Princesa Alice, sobretudo, para os dinoflagelados, cujos valores médios são mais baixos do que os das diatomáceas. Nestas regiões com menor biomassa global, as diatomáceas continuam a contribuir de forma dominante para a biomassa total, o que reforça a sua importância ecológica independentemente do local.



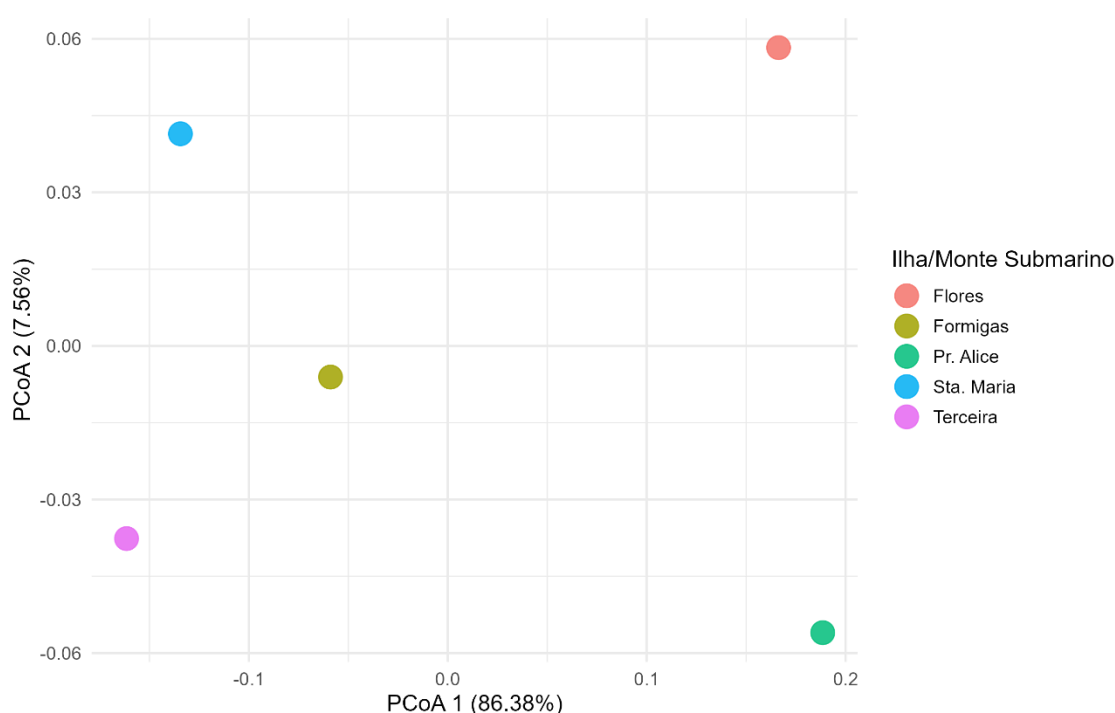
**Figura III-15:** Biomassa média de carbono dos dois grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) por ilha e monte submarino dos Açores.

### III.3.1. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na composição microfitoplanctónica

Foram realizadas a PCoA e a PERMANOVA para avaliar diferenças na estrutura da comunidade microfitoplanctónica, analisando a composição taxonómica em função das ilhas e montes. A PCoA com o objetivo de visualizar os padrões de similaridade/dissimilaridade na composição da comunidade microfitoplanctónica entre as ilhas e os montes submarinos e a PERMANOVA para testar diferenças na estrutura das comunidades microfitoplanctónicas, nesses mesmos locais.

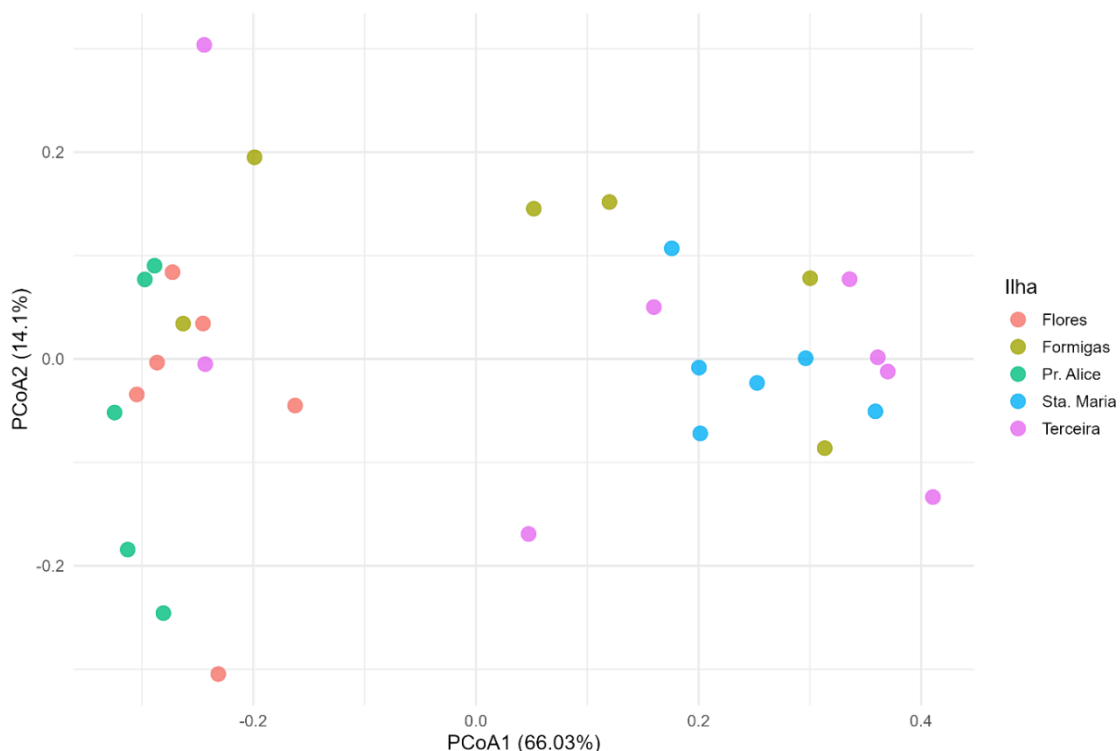
O gráfico da Figura III-16 representa a PCoA baseada na dissimilaridade de *Bray-Curtis* da composição taxonómica do microfitoplâncton, ao nível da ordem, utilizando a média das abundâncias por ilha e monte como variável base. A PCoA gerado reflete as diferenças médias na composição do microfitoplâncton entre os locais amostrados, sem considerar variações entre estações dentro de cada ilha. Os eixos PCoA1 (86.38%) e PCoA2 (7.56%) explicam a maior parte da variação nos dados. A separação dos pontos sugere diferenças na estrutura média da comunidade entre os locais. Flores e o Banco Princesa Alice posicionam-se ambos à direita no eixo PCoA1, sugerindo alguma semelhança

na composição relativa à variação principal. No entanto, a separação entre eles no eixo PCoA2 indica diferenças adicionais na composição da comunidade microfitoplanctónica. Já Santa Maria e Terceira aparecem mais afastadas, sugerindo alguma diferenciação. O Banco das Formigas ocupa uma posição intermédia. Como esta análise se baseia em médias por local, não reflete a variabilidade interna de cada grupo. Ainda assim, permite uma visualização clara de tendências gerais entre as ilhas e os montes submarinos.



**Figura III-16:** Análise de Coordenadas Principais (PCoA) baseada na dissimilaridade de *Bray-Curtis* da composição taxonómica do microfitoplâncton, ao nível da ordem. Cada ponto representa a composição média das comunidades microfitoplanctónicas de uma ilha ou monte submarino, com cores distintas para cada local amostrado.

O gráfico da Figura III-17 representa a PCoA baseada na dissimilaridade de *Bray-Curtis* da composição taxonómica do microfitoplâncton, ao nível da ordem, utilizando as abundâncias individuais por estação como variável base. A análise reflete as diferenças entre ilhas e montes submarinos na composição do microfitoplâncton, preservando a variabilidade intra-ilha e avaliando o padrão global entre todas as amostras individuais.



**Figura III-17:** Análise de Coordenadas Principais (PCoA) baseada na matriz de dissimilaridade de Bray-Curtis da composição taxonómica da comunidade microfítocoplânctónica ao nível da ordem, considerando as abundâncias por amostra. Cada ponto representa uma amostra individual, com cores distintas associadas às diferentes ilhas e montes submarinos.

As amostras estão agrupadas por ilha ou monte submarino, mas sem uma separação completamente nítida entre os grupos. Observa-se maior dispersão intra-regional nas amostras das Formigas e da Terceira, ambas com duas estações deslocadas para a região esquerda do gráfico, próxima das amostras de Flores e Princesa Alice. Flores e Princesa Alice, por sua vez, apresentam distribuição mais coesa, com as amostras concentradas no quadrante esquerdo, enquanto Santa Maria tende a ocupar o quadrante direito, com relativa consistência interna.

O Eixo 1 (PCoA1) explica 66.03% da variância na composição taxonómica ao nível da ordem e parece refletir um gradiente principal de diferenciação regional. As amostras de Santa Maria e parte da Terceira posicionam-se sobretudo à direita, enquanto as de Flores e Princesa Alice predominam à esquerda. O Eixo 2 (PCoA2), que representa 14.1% da variância, contribui para uma separação vertical mais difusa, não evidenciando uma estrutura clara entre regiões.

A análise realizada permite avaliar se as ilhas e montes submarinos influenciam a composição taxonômica da comunidade fitoplanctônica, testando a hipótese nula ( $H_0$ : *Não há influência das ilhas na abundância, composição e distribuição da comunidade fitoplanctônica*).

Para testar estatisticamente se há diferenças significativas entre as ilhas e os montes submarinos, aplicou-se uma análise PERMANOVA (*adonis2*) (Tabela III-2) com o fator "Ilha/Monte". Foi criada uma matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis* com base nas abundâncias das diferentes ordens de microfitoplâncton por amostra. Cada amostra/estação foi tratada individualmente, mantendo-se assim a variabilidade intra-ilha e permitindo uma avaliação mais rigorosa das diferenças espaciais. A análise utilizou 999 permutações, assegurando robustez estatística. Os resultados mostraram que a composição da comunidade microfitoplanctônica ao nível da ordem varia significativamente entre as ilhas e montes submarinos. O fator "Ilha/Monte" explicou 44.76% da variação total ( $R^2 = 0.44755$ ;  $p = 0.002$ ), indicando um efeito geográfico relevante. O valor de pseudo-F ( $F = 5.27$ ) reforça que a variabilidade entre os grupos (ilhas/ montes) é maior do que a variabilidade dentro de cada grupo.

**Tabela III-2:** Resultados da análise PERMANOVA (*Permutational Multivariate Analysis of Variance*) realizada para testar diferenças na composição taxonômica do microfitoplâncton ao nível da ordem entre ilhas e montes submarinos. A matriz de dissimilaridade foi calculada utilizando a distância de *Bray-Curtis*, com transformação de *Hellinger* aplicada às abundâncias por estação.

Termo	Df	Soma dos Quadrados	R <sup>2</sup>	F	p-valor
Ilha/Monte	4	0.72658	0.44755	5.2659	<b>0.002</b>
Residual	26	0.89687	0.55245		
Total	30	1.62345	1		

O  $p$ -valor significativo (0.002) confirma que estas diferenças não são aleatórias, refletindo padrões reais na estrutura da comunidade microfitoplanctônica. Assim, pode-se rejeitar a hipótese nula formulada:  $H_0$ : *Não há influência detetável das ilhas na abundância, composição e distribuição da comunidade fitoplanctônica; especialmente, não há upwelling, o que poderia aumentar o crescimento do microfitoplâncton*.

A análise PERMANOVA pareada (*post-hoc*) foi aplicada com 999 permutações para identificar quais os pares de ilhas e montes submarinos que apresentam diferenças significativas entre si, dado que a PERMANOVA global indicou variação estatisticamente significativa na composição da comunidade. Esta análise revelou diferenças significativas na composição taxonómica do microfitoplâncton ao nível da ordem entre vários pares de localidades (*cf.* Tabela III-3), evidenciando a influência espacial (ilhas e montes submarinos) na estrutura das comunidades microfitoplanctónicas.

**Tabela III-3:** Resultados da análise PERMANOVA pareada (999 permutações) aplicada à composição taxonómica do microfitoplâncton ao nível da ordem, entre pares de ilhas e montes submarinos. Estão indicados os valores da estatística pseudo-F (F.Model) e os respetivos *p*-valores.

<b>Comparação</b>	<b>F. Model</b>	<b><i>p</i>-valor</b>
Flores vs. Pr. Alice	1.557	0.168
Flores vs. Terceira	4.627	<b>0.024</b>
Flores vs. Sta. Maria	17.077	<b>0.003</b>
Flores vs. Formigas	3.386	<b>0.045</b>
Pr. Alice vs. Terceira	7.414	<b>0.014</b>
Pr. Alice vs. Sta. Maria	35.08	<b>0.002</b>
Pr. Alice vs. Formigas	5.572	<b>0.027</b>
Terceira vs. Sta. Maria	1.181	0.334
Terceira vs. Formigas	1.022	0.33
Sta. Maria vs. Formigas	3.312	0.06

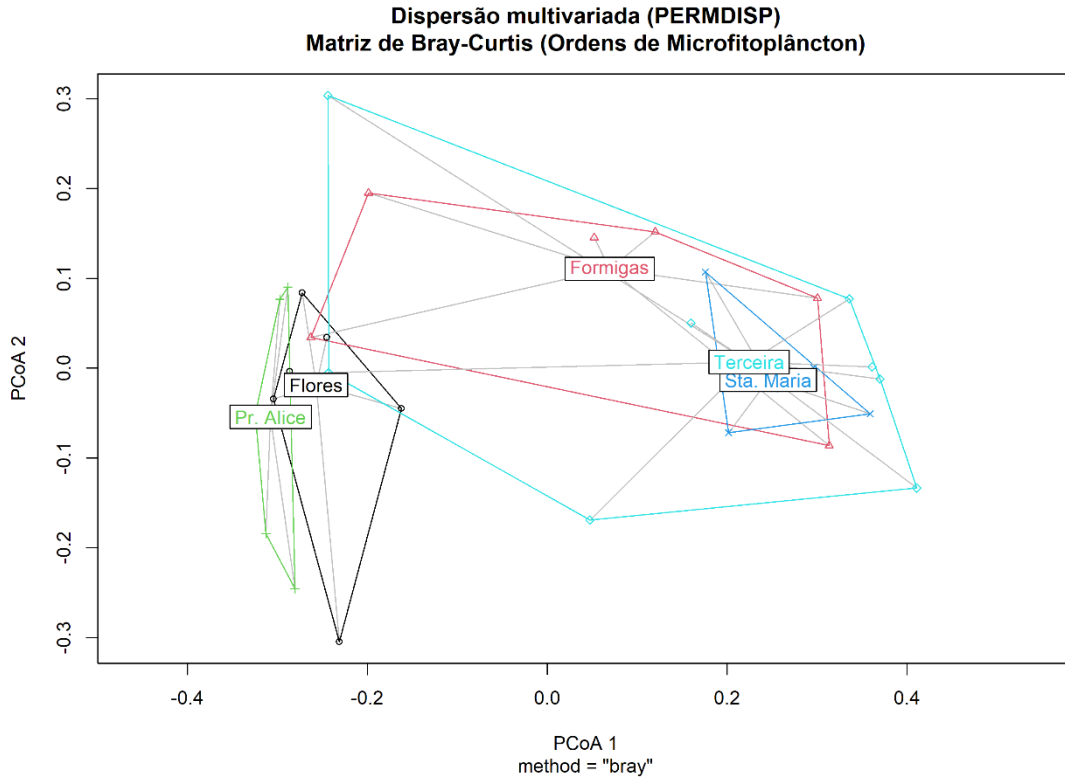
As comparações com  $p < 0.05$  indicam variações estatisticamente significativas na estrutura das comunidades de microfitoplâncton entre os locais. Santa Maria destacou-se por apresentar diferenças marcantes em relação a Flores e ao Banco Princesa Alice, sugerindo uma composição taxonómica distinta nesta região. Flores e Princesa Alice apresentaram ambas diferenças significativas com Terceira, Santa Maria e Formigas. Estes padrões reforçam a existência de uma heterogeneidade regional na composição das ordens de microfitoplâncton. Por outro lado, as comparações entre Flores e Princesa Alice, Formigas e Terceira, bem como entre Santa Maria e Terceira e Formigas e Santa Maria, não revelaram diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0.05$ ),

sugerindo que, nestes casos, a composição taxonómica das comunidades pode ser mais similar. De uma forma geral, os resultados apontam para uma diferenciação evidente entre algumas ilhas e montes submarinos, sendo Santa Maria, Flores e o Banco Princesa Alice os locais com maior dissimilaridade em relação às restantes regiões amostradas.

A PERMDISP é essencial para validar os resultados da PERMANOVA, garantindo que as diferenças na composição microfitoplanctónica entre as ilhas e os montes submarinos são robustas e não resultam de dispersão desigual das amostras. Esta análise testa se há diferenças significativas na dispersão (variabilidade intra-grupo) das amostras entre as diferentes ilhas e montes submarinos. O teste foi realizado com 999 permutações, garantindo robustez estatística. A dispersão foi calculada com base na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis* que quantifica a variação na composição da comunidade microfitoplanctónica entre as amostras. Os resultados mostraram um valor de  $F = 2.4775$  e um  $p$ -valor de 0.061, indicando que não há diferenças estatisticamente significativas na dispersão entre os grupos ( $p > 0.05$ ) (Tabela III-4; Figura III-18). A heterogeneidade interna das comunidades microfitoplanctónicas parece ser semelhante entre as ilhas e montes submarinos. Assim, os resultados da PERMANOVA global podem ser interpretados com maior confiança, pois as diferenças observadas na composição da comunidade não são influenciadas por variações de dispersão, mas sim por diferenças reais na estrutura da comunidade microfitoplanctónica entre os grupos analisados.

**Tabela III-4:** A tabela apresenta os resultados da análise PERMDISP (*Permutational Analysis of Multivariate Dispersions*), que testa a homogeneidade da variância (dispersão) entre grupos com base em distâncias multivariadas. A coluna "Df" indica os graus de liberdade, enquanto "Soma dos Quadrados" e "Quadrado Médio" representam, respetivamente, a variação total explicada e a sua média por grau de liberdade. A "Estatística F" é usada para testar diferenças de dispersão entre os grupos. O valor-p (" $\text{Pr}(>F)$ ") foi calculado com base em 999 permutações e indica a probabilidade de observar a estatística F sob a hipótese nula de dispersões iguais.

Termo	Df	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor $p$ ( $\text{Pr}(>F)$ )
Grupos	4	0.11665	0.029163	2.4775	0.061
Resíduos	26	0.30604	0.011771		



**Figura III-18:** Representação gráfica do teste de dispersão multivariada (PERMDISP), com base na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis*, utilizando uma Análise de Coordenadas Principais (PCoA). Cada ponto representa uma amostra individual, ligada ao centróide do respetivo grupo (ilha ou monte submarino). As linhas delimitam a variabilidade interna de cada grupo, evidenciando a dispersão das amostras.

### III.3.1.1. Índices de diversidade nas ilhas e montes submarinos

Foram calculados três índices ecológicos por estação — diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), riqueza específica ( $S$ ) e equidade de *Pielou* ( $J'$ ) — com base nas abundâncias somadas por espécie, excluindo apenas as categorias não identificadas genéricas (NI-UDiatom, NI-UDino, NI-UPOA e NI-UPOB). Os registos taxonómicos com resolução morfológica ou funcional relevante, incluindo categorias como NI-Centrales e NI-Pennales, e as entradas designadas como “sp.” ou “spp.” foram mantidas. Posteriormente, os valores foram agrupados por ilha ou monte submarino para análise comparativa.

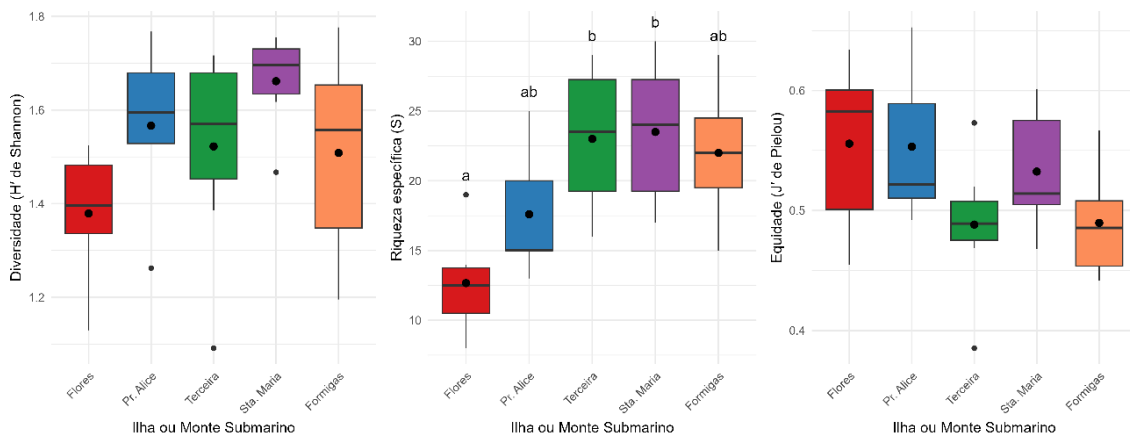
Aplicou-se o teste de *Kruskal-Wallis* para avaliar diferenças estatisticamente significativas entre os locais de amostragem. No caso do índice de *Shannon*, o teste revelou um valor- $p$  de 0.1152, não significativo ao nível de  $\alpha = 0.05$ , embora se observe uma separação entre as medianas das distribuições regionais. Para o índice de riqueza, o teste indicou diferenças estatisticamente

significativas entre as ilhas e montes submarinos ( $p = 0.0073$ ), e para a equidade de *Pielou* o resultado não foi significativo ( $p = 0.1629$ ). Em termos descritivos, o valor médio de  $H'$  variou entre 1.379 (Flores) e 1.6616 (Santa Maria), sugerindo um gradiente moderado de diversidade específica entre os locais. A riqueza (número de espécies) média foi mais elevada em Santa Maria (23.5 espécies) e Terceira (23.0), e mais baixa nas Flores (12.67). Quanto à equidade, os valores foram geralmente reduzidos, com o máximo registado nas Flores ( $J' = 0.5557$ ), evidenciando maior uniformidade na distribuição das abundâncias relativas das espécies (Tabela III-5).

Os *boxplots* da Figura III-19 ilustram a variabilidade dos três índices por ilha e monte submarino, evidenciando padrões distintos. As maiores medianas de diversidade e riqueza ocorrem nas regiões central e oriental (Terceira, Santa Maria, Formigas), enquanto os valores mais baixos se concentram em áreas mais periféricas do arquipélago, como as Flores.

**Tabela III-5:** Valores médios dos índices ecológicos de diversidade calculados por ilha e monte submarino. O índice de *Shannon* ( $H'$ ) representa a diversidade específica, a riqueza ( $S$ ) corresponde ao número médio de grupos taxonómicos distintos por estação, e a equidade de *Pielou* ( $J'$ ) expressa a uniformidade na distribuição das abundâncias relativas. Os valores foram obtidos a partir das estações amostradas em cada local, com exclusão apenas das categorias não identificadas sem resolução morfológica (NI-UDiatom, NI-UDino, NI-UPOA e NI-UPOB). A coluna "n" indica o número de estações consideradas por ilha e monte.

<b>Ilha/Monte</b>	<b><i>Shannon</i> (<math>H'</math>)</b>	<b>riqueza (<math>S</math>)</b>	<b>equidade (<math>J'</math>)</b>	<b>n</b>
Flores	1.379	12.67	0.5557	6
Pr. Alice	1.5666	17.6	0.5532	5
Terceira	1.5222	23	0.4883	8
Sta. Maria	1.6616	23.5	0.5325	6
Formigas	1.5083	22	0.4896	6



**Figura III-19:** *Boxplots* dos valores individuais dos índices ecológicos por estação para cada ilha ou monte submarino: **(à esquerda)** índice de diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), **(ao meio)** riqueza específica ( $S$ ) e **(à direita)** equidade de *Pielou* ( $J'$ ). As caixas representam o intervalo interquartil (25.º a 75.º percentil), com a mediana indicada pela linha horizontal e a média assinalada por um ponto preto. Os dados foram agrupados por ilha/monte e organizados segundo a ordem geográfica: Flores, Princesa Alice, Terceira, Santa Maria e Formigas. No gráfico da Riqueza específica ( $S$ ), as letras minúsculas acima das caixas indicam os grupos homogêneos obtidos com base no teste *post hoc* de *Dunn* (com correção de *Holm*). Ilhas com letras diferentes apresentam diferenças estatisticamente significativas. Em particular, a ilha das Flores apresentou valores de riqueza significativamente mais baixos do que a Terceira e Santa Maria ( $p$  ajustado  $< 0.05$ ).

Para identificar quais os pares de regiões que apresentaram diferenças estatisticamente significativas na riqueza específica ( $S$ ), foi realizado um teste *post hoc* de *Dunn* com correção de *Holm*, na sequência do teste de *Kruskal-Wallis*. Os resultados indicaram que as comparações entre Flores e Santa Maria ( $p = 0.020$ ) e entre Flores e Terceira ( $p = 0.018$ ) foram estatisticamente significativas, mesmo após o ajustamento para múltiplas comparações (Tabela D-I, Anexo D; Figura III-19). Isto sugere que as ilhas do setor central e oriental apresentaram riqueza específica significativamente mais elevada do que a ilha das Flores. As restantes comparações não revelaram diferenças significativas, o que indica que a riqueza específica é mais homogênea entre as outras regiões do arquipélago.

### III.3.2. Avaliação da influência das ilhas e montes submarinos na biomassa de carbono

O teste de *Shapiro-Wilk* resultou num  $p$ -valor = 0.00061, indicando que a biomassa de carbono não segue uma distribuição normal. Dado que a normalidade não é atendida, foi usado o teste de *Kruskal-Wallis* para verificar se

há diferenças significativas na biomassa de carbono entre diferentes ilhas/montes submarinos. O teste de *Kruskal-Wallis* resultou num *p*-valor menor que 0.05 (*p*-valor = 0.009155), indicando diferenças significativas na biomassa de carbono entre ilhas/montes submarinos.

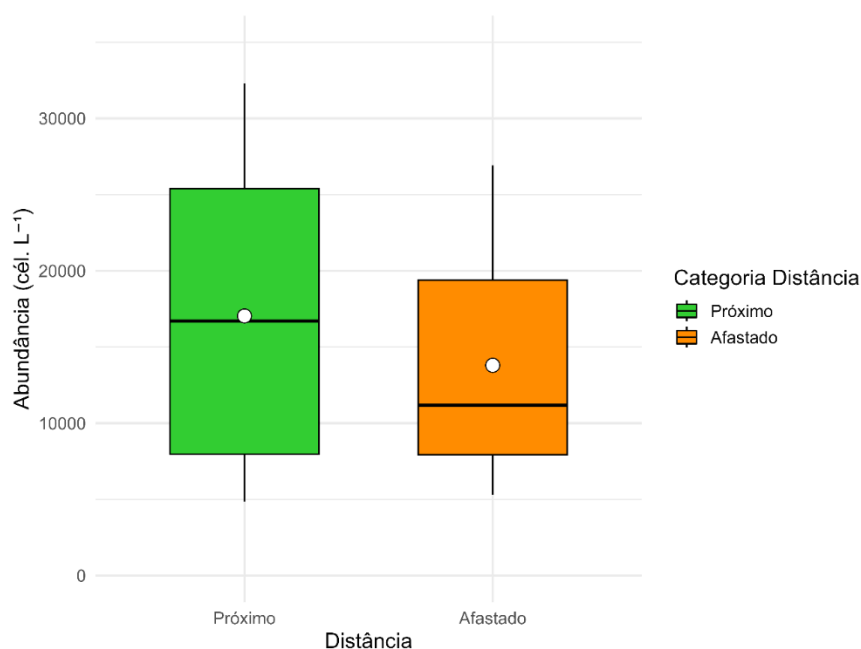
Uma vez que as diferenças globais foram estatisticamente significativas, aplicou-se o teste *post hoc* de *Dunn* (baseado em comparações de *Mann-Whitney*) para identificar quais os pares de ilhas e montes submarinos apresentavam variações significativas entre si, comparando todas as combinações possíveis. Para controlar o erro do tipo I (falsos positivos) associado a múltiplas comparações, os *p*-valores foram ajustados segundo o método de *Holm*. Após a análise dos resultados do teste de *Dunn*, nenhuma comparação apresentou diferença estatisticamente significativa (*P.adj* < 0.05). No entanto, alguns pares de localidades apresentaram valores ajustados próximos do limiar de significância estatística (*P.adj* < 0.10), nomeadamente, Santa Maria vs. Princesa Alice (*P.adj* = 0.0623) e Santa Maria vs. Flores (*P.adj* = 0.0632), sugerindo uma possível tendência para diferenças na biomassa de carbono entre estes grupos (*cf.* Tabela III-6).

**Tabela III-6:** Comparações par-a-par entre ilhas e montes submarinos para a biomassa de carbono (teste de *Dunn*), com os respetivos valores do teste estatístico *Z*, *p*-valor não ajustado (*P.unadj*) e *p*-valor ajustado (*P.adj*) utilizando o método de *Holm* para correção de múltiplas comparações.

<b>Comparação</b>	<b>Z</b>	<b>P.unadj</b>	<b>P.adj</b>
Flores - Formigas	-2.159	0.031	0.185
Flores - Pr. Alice	0.097	0.923	0.923
Formigas - Pr. Alice	2.155	0.031	0.156
Flores - Sta. Maria	-2.731	0.006	0.063
Formigas - Sta. Maria	-0.572	0.568	1.000
Pr. Alice - Sta. Maria	-2.700	0.007	0.062
Flores - Terceira	-2.198	0.028	0.224
Formigas - Terceira	0.110	0.912	1.000
Pr. Alice - Terceira	-2.185	0.029	0.202
Sta. Maria - Terceira	0.721	0.471	1.000

### III.4. Abundância, composição da comunidade microfitoplanctónica e biomassa de carbono pela distância à costa

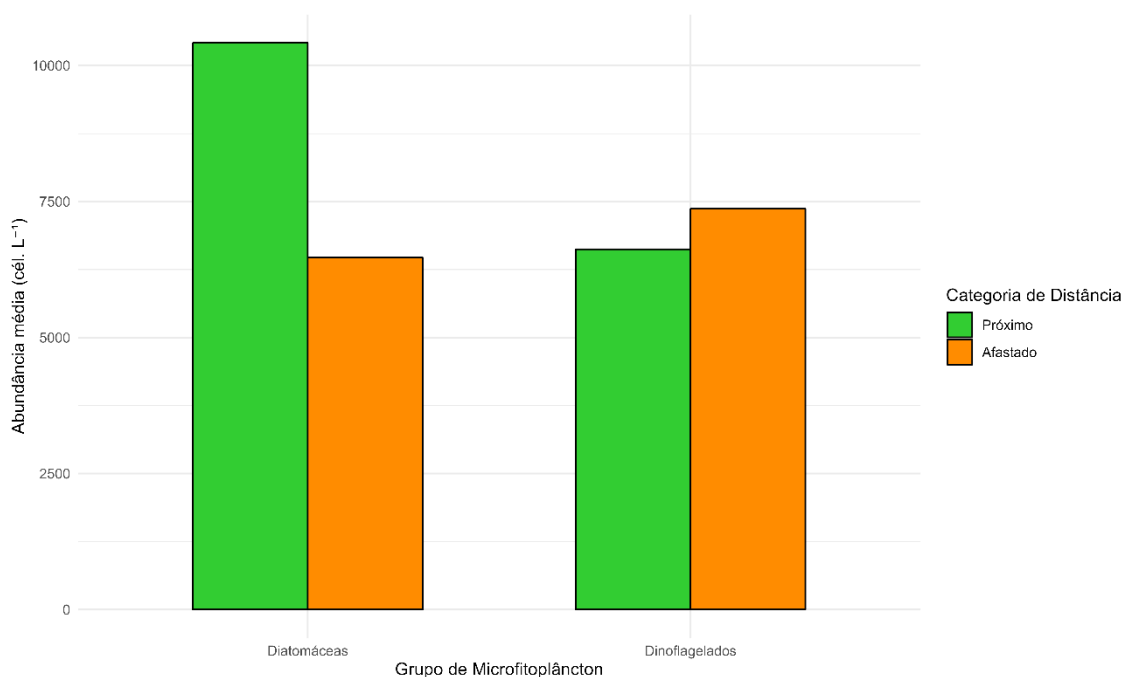
O gráfico da Figura III-20 apresenta a distribuição da abundância de microfitoplâncton por categoria de distância, com base na divisão das estações em dois grupos definidos pela mediana dos valores de distância em relação ao ponto de referência. A categoria "Próximo" compreende as estações situadas a distâncias inferiores ou iguais à mediana (6.8 km), enquanto a categoria "Afastado" inclui as restantes. Observa-se que a categoria "Próximo" apresenta uma distribuição da abundância mais ampla, com valores médios e medianos mais elevados do que os verificados na categoria "Afastado". Além disso, a dispersão dos dados também parece mais acentuada neste grupo, refletindo uma maior variabilidade entre as estações que o compõem. No grupo "Afastado", a abundância apresenta-se mais concentrada em torno de valores medianos e inferiores, com menor amplitude entre os quartis.



**Figura III-20:** A distribuição da abundância do microfitoplâncton foi representada por categorias de distância ("Próximo", a verde e "Afastado", a laranja), definidas a partir da mediana dos valores obtidos entre as estações amostradas. Em cada categoria, a abundância foi apresentada sob a forma de *boxplots*, onde é visível a dispersão dos dados (com os valores extremos ocultados para maior legibilidade). Foi assinalada a média da abundância através de um ponto branco central, permitindo comparar visualmente a tendência central entre as duas categorias.

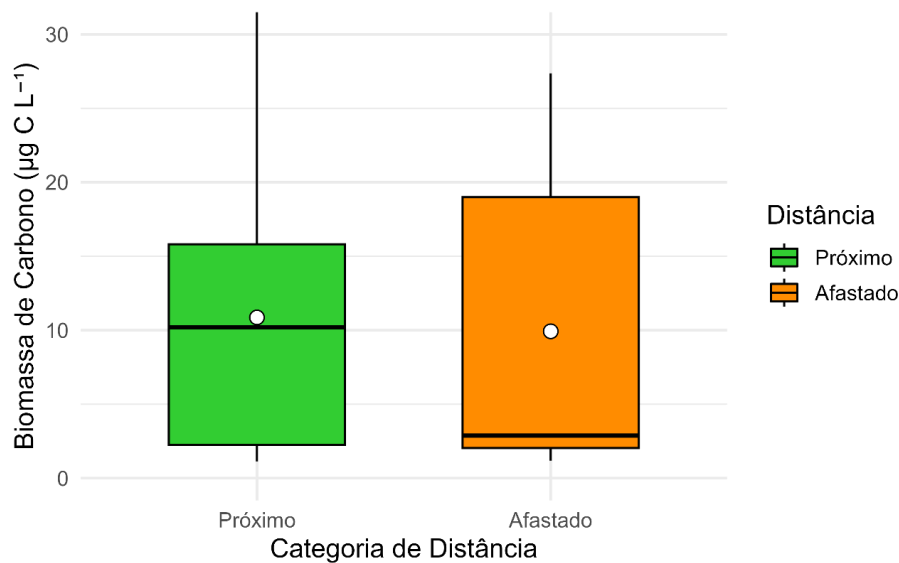
A Figura III-21 mostra a abundância média dos principais grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) em dois contextos espaciais

distintos: áreas próximas e distantes. No grupo das diatomáceas, a abundância média foi visivelmente superior nas estações classificadas como "Próximo", em comparação com as estações mais afastadas. No caso dos dinoflagelados, as abundâncias médias mantêm-se relativamente próximas entre as duas categorias de distância, com uma ligeira tendência para valores superiores nas estações mais afastadas. As diatomáceas apresentam, pois, uma maior abundância em áreas próximas e os dinoflagelados em áreas distantes.



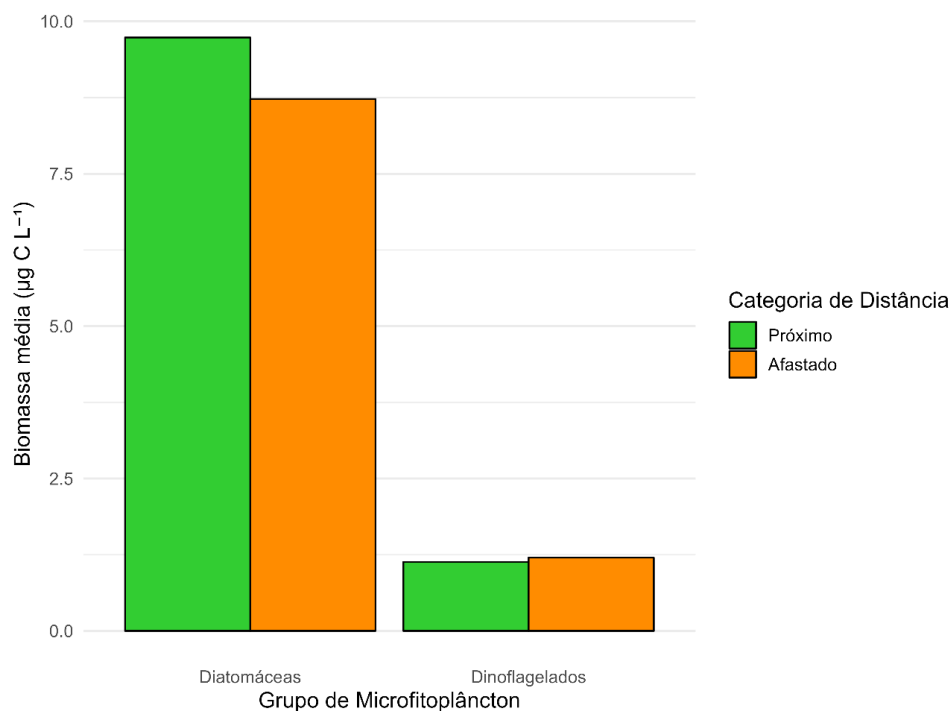
**Figura III-21:** Abundância média de microfitoplâncton por grupo taxonômico (diatomáceas e dinoflagelados) e por categoria de distância em relação à costa. As categorias de distância foram definidas com base na mediana dos valores registados entre as estações amostradas, sendo classificadas como "Próximo" (verde) e "Afastado" (laranja).

Os *boxplots* (Figura III-22) mostram a distribuição da biomassa de carbono em função da distância à costa, categorizada como "Próximo" e "Afastado". A biomassa média (representada pelo círculo branco) e a mediana (linha horizontal) são mais elevadas na categoria "Próximo", indicando uma tendência de maior biomassa microfitoplanctónica junto à costa. Observa-se também que a variabilidade dos dados (intervalo interquartil) é superior na categoria "Afastado", refletindo uma maior dispersão dos valores de biomassa em regiões oceânicas.



**Figura III-22:** Distribuição da biomassa de carbono em função da distância à costa, categorizada como “Próximo” e “Afastado”, com base na mediana das distâncias. O *boxplot* apresenta a mediana (linha horizontal dentro da caixa), o intervalo interquartil (caixa) e os valores extremos (bigodes). A média é assinalada pelo símbolo branco.

A análise da biomassa média de carbono dos principais grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) revelou diferenças na sua contribuição relativa em função da distância à linha de costa, considerando como ponto de corte a mediana de 6.8 km (Figura III-23). As diatomáceas apresentaram os valores médios mais elevados de biomassa em ambas as categorias de distância, dominando a comunidade microfitoplanctónica. Esta predominância foi ligeiramente mais acentuada nas amostras recolhidas a menos de 6.8 km da costa (barra verde), em comparação com aquelas obtidas a distâncias superiores (barra laranja). Por sua vez, os dinoflagelados apresentaram valores de biomassa inferiores em ambas as categorias, com uma redução na categoria mais próxima. Estes resultados indicam que as diatomáceas constituem o grupo dominante em termos de biomassa de carbono ao longo do gradiente espacial analisado, enquanto os dinoflagelados mantêm uma contribuição reduzida, independentemente da distância à costa.



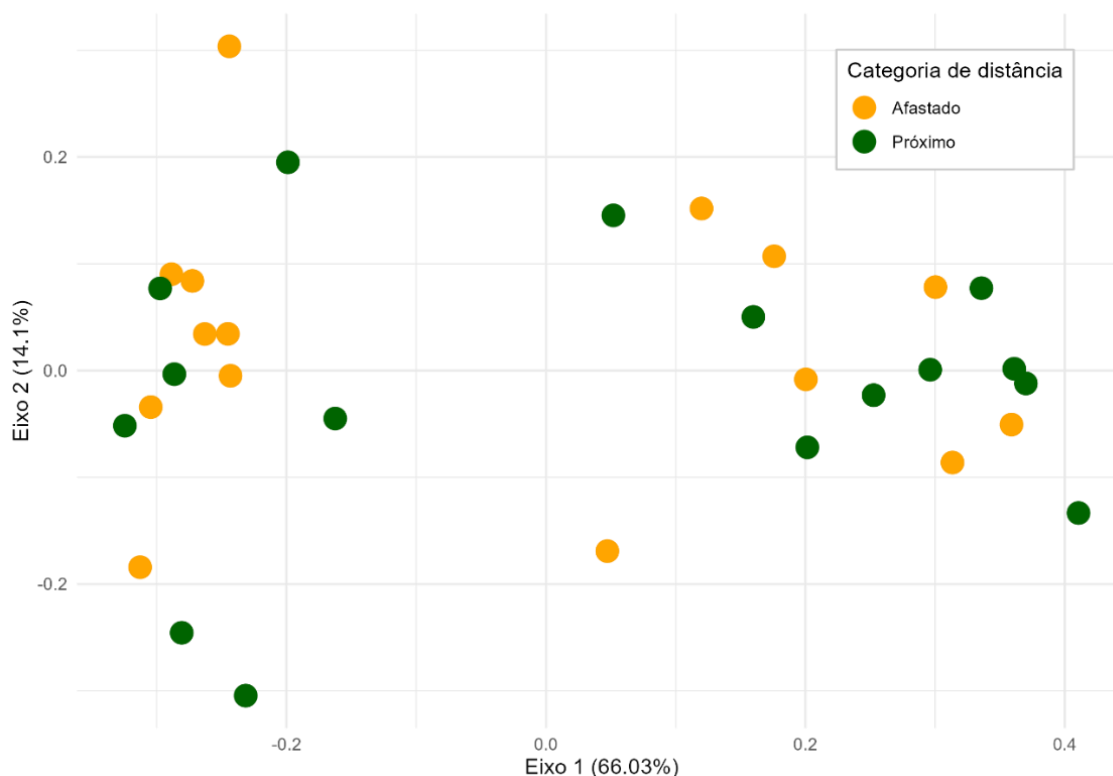
**Figura III-23:** Biomassa média de carbono (proporção relativa) dos principais grupos de microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) em duas categorias de distância em relação à linha de costa, definidas com base na mediana (6.8 km). As barras representam a contribuição média de cada grupo para a biomassa total nas amostras recolhidas a menos de 6.8 km (verde) e a mais de 6.8 km (laranja) da costa.

#### III.4.1. Avaliação da influência da distância à costa na composição microfitoplanctónica

A PCoA foi aplicada com base na matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis*, construída a partir das abundâncias das ordens microfitoplanctónicas de amostras individuais. Esta abordagem permitiu representar graficamente a variação na composição taxonómica entre amostras, num espaço bidimensional reduzido (Figura III-24). O primeiro eixo da ordenação explicou 66.03% da variação observada, enquanto o segundo eixo representou 14.1%, totalizando 80.13% da variância explicada. Cada ponto do gráfico resultante corresponde a uma amostra individual, sendo a sua posição relativa indicativa do grau de semelhança em termos de composição microfitoplanctónica com outras amostras. As cores atribuídas a cada ponto distinguem as categorias de distância à costa (“Próximo” e “Afastado”), permitindo observar visualmente padrões estruturais potenciais relacionados com este fator. Observa-se que os

pontos verdes (“Próximo”) e laranja (“Afastado”) estão dispersos e misturados no espaço da PCoA.

Os resultados foram validados por meio de análises estatísticas, como a PERMANOVA, com o objetivo de testar se as diferenças são estatisticamente significativas.



**Figura III-24:** Representação gráfica da Análise de Coordenadas Principais (PCoA), baseada na distância de *Bray-Curtis*, considerando as abundâncias das ordens microfitoplanctônicas de amostras individuais. Cada ponto representa uma amostra, classificada como “Próximo” ou “Afastado”, de acordo com a sua proximidade à costa ou ponto de referência. A disposição dos pontos no espaço bidimensional reflete o grau de similaridade na composição microfitoplanctônica entre os grupos, permitindo avaliar padrões estruturais na comunidade.

A análise estatística PERMANOVA resultou num valor de  $p = 0.438$ , superior ao limiar convencional de significância de 0.05, indicando ausência de evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula (*Não há diferença entre a abundância e a composição da comunidade fitoplanctônica perto da costa e longe da costa*) (Tabela III-9). A variável “Proximidade” (distância relativa à costa) explicou apenas 2.61% da variação na composição da comunidade microfitoplanctônica ( $R^2 = 0.02614$ ), enquanto os 97.39% restantes foram atribuídos à variação residual. O valor de  $F = 0.7783$  sugere que a variação entre

os grupos (“Próximo” vs. “Afastado”) não é significativamente maior do que a variação dentro dos próprios grupos. Estes resultados indicam que a proximidade à costa não tem um efeito estatisticamente significativo sobre a composição das ordens microfitoplanctónicas. Assim, com base na PERMANOVA aplicada à matriz de *Bray-Curtis*, não se observam diferenças significativas na composição taxonómica das comunidades microfitoplanctónicas em função da distância à costa.

**Tabela III-7:** Resultados da análise PERMANOVA aplicada à matriz de dissimilaridade de *Bray-Curtis* para avaliar o efeito da proximidade à costa na composição taxonómica das comunidades microfitoplanctónicas. A variável “Proximidade” (grupos “Próximo” vs. “Afastado”) não apresentou efeito estatisticamente significativo ( $p = 0.438$ ), explicando apenas 2.61% da variação observada ( $R^2 = 0.02614$ ). A maior parte da variação (97.39%) foi atribuída ao componente residual.

Fonte de variação	Df	Soma dos quadrados	R <sup>2</sup>	F	p-valor
Grupos	1	0.0888	0.02614	0.7783	0.438
Residual	29	3.3097	0.97386		
Total	30	3.3985	1		

#### III.4.1.1. Índices de diversidade por distância à costa

Foram calculados três índices ecológicos por estação — diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), riqueza específica ( $S$ ) e equidade de *Pielou* ( $J'$ ) — com base nas abundâncias somadas por espécie, excluindo apenas as categorias não identificadas genéricas (NI-UDiatom, NI-UDino, NI-UPOA e NI-UPOB), mas mantendo os registos taxonómicos com resolução morfológica ou funcional relevante, como as categorias NI-Centrales e NI-Pennales, e as entradas designadas como “sp.” ou “spp.” Posteriormente, os valores foram agrupados por categoria de distância em “Próximo” e “Afastado” para análise comparativa.

O teste de *Wilcoxon* aplicado aos valores individuais do Índice de Diversidade de *Shannon* ( $H'$ ) por estação não indicou diferenças estatisticamente significativas entre as duas categorias de distância à costa ( $W = 124$ ,  $p = 0.8916$ ). Este resultado sugere que, no geral, a diversidade específica do microfitoplâncton tende a manter-se relativamente estável entre zonas mais próximas e mais afastadas da costa. De forma descritiva, a média do índice de *Shannon* foi ligeiramente superior nas estações classificadas como “Próximo”

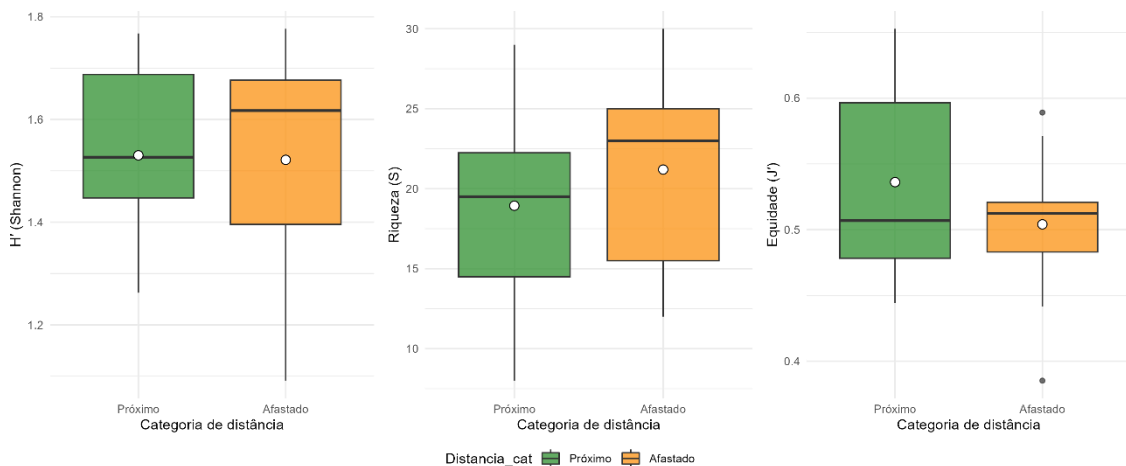
(1.5096), em comparação com as estações “Afastado” (1.4928), mas sem relevância estatística (Tabela III-8).

Resultados semelhantes foram observados para os outros dois índices ecológicos avaliados. O teste de *Wilcoxon* aplicado à riqueza específica (S) também não revelou diferenças significativas entre as categorias ( $W = 143.5$ ,  $p = 0.3623$ ), embora a média de espécies tenha sido mais elevada no grupo “Próximo” (21.44 espécies) do que no grupo “Afastado” (17.46 espécies). Já para a equidade de *Pielou* ( $J'$ ), o teste indicou igualmente ausência de diferenças significativas ( $W = 98$ ,  $p = 0.4008$ ), com valores médios semelhantes entre categorias (“Afastado”: 0.5222; “Próximo”: 0.5125) (Tabela III-8).

Os *boxplots* (Figura III-25) refletem esta tendência geral de sobreposição entre as distribuições dos três índices ecológicos nas duas categorias espaciais, com alguma variabilidade interna em ambas. Esta heterogeneidade sugere que outros fatores ambientais locais poderão exercer um papel mais relevante na estruturação das comunidades fitoplanctônicas do que a distância à linha costeira.

**Tabela III-8:** Valores médios dos índices ecológicos do microfitoplâncton por categoria de distância em relação à costa. Apresentam-se os valores médios do índice de diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), da riqueza específica (S) e da equidade de *Pielou* ( $J'$ ), calculados a partir das estações atribuídas a cada categoria (“Próximo” ou “Afastado”). A coluna “n” indica o número de estações incluídas em cada grupo.

<b>Categoria de distância</b>	<b>Shannon (<math>H'</math>)</b>	<b>riqueza (S)</b>	<b>equidade (<math>J'</math>)</b>	<b>n</b>
Próximo	1.5096	21.44	0.5125	16
Afastado	1.4928	17.46	0.5222	15



**Figura III-25:** *Boxplots* dos valores individuais dos índices ecológicos do microfitoplâncton por categoria de distância em relação à costa. Os gráficos representam, da esquerda para a direita, o índice de diversidade de *Shannon* ( $H'$ ), a riqueza específica ( $S$ ) e a equidade de *Pielou* ( $J'$ ), respectivamente. As caixas indicam a dispersão dos dados por categoria (“Próximo” e “Afastado”), os traços horizontais representam as medianas e os pontos brancos correspondem às médias. As cores correspondem às categorias de distância: verde para “Próximo” e laranja para “Afastado”.

#### III.4.2. Avaliação da influência da distância à costa na biomassa de carbono

O teste de *Wilcoxon Rank-Sum* foi utilizado para avaliar se existem diferenças estatisticamente significativas na biomassa de carbono microfitoplanctônica entre as categorias de distância “Próximo” e “Afastado” da costa. O resultado do teste ( $U = 125.0$ ;  $p = 0.861$ ) indica que não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula: *Não há diferença entre a abundância e a composição da comunidade fitoplanctônica perto da costa e longe da costa*. Assim, a biomassa não difere significativamente entre zonas costeiras e oceânicas, com base nas amostras analisadas. Estes resultados sugerem que a distância à costa, por si só, não exerce um efeito determinante na variação da biomassa fitoplanctônica entre as estações amostradas.

#### III.5. Relações entre a abundância, a biomassa de carbono e parâmetros físico-químicos

As análises de correlação de *Spearman* entre as variáveis ambientais e as variáveis biológicas (biomassa de carbono e abundância de microfitoplâncton), realizadas ao nível das estações de amostragem, estão sintetizadas na Tabela

E-I, Anexo E, no Gráfico de Barras (Figura III-26) e no Mapa de Correlações (Figura III-27).

Verifica-se uma correlação positiva muito forte entre a biomassa e a abundância de microfitoplâncton ( $r = 0.91$ ), evidenciada no mapa de correlação (Figura III-27), o que confirma a relação direta expectável entre a densidade celular e a biomassa total. Salienta-se que esta correlação não se encontra discriminada na Tabela E-I por esta incluir apenas correlações entre variáveis biológicas e ambientais.

A temperatura revelou uma correlação moderada positiva com a biomassa ( $r = 0.50$ ;  $p = 0.0046$ ) e uma correlação forte positiva com a abundância ( $r = 0.58$ ;  $p = 0.0007$ ), com significância estatística (Tabela E-I Anexo E; Figura III-26).

A distância à costa apresentou correlação fraca negativa com a biomassa ( $r = -0.13$ ;  $p = 0.49$ ) e também fraca com a abundância ( $r = -0.17$ ;  $p = 0.37$ ), sugerindo que as áreas mais próximas da costa tendem, embora ligeiramente, a apresentar maior biomassa.

A profundidade revelou uma correlação moderada negativa com a biomassa ( $r = -0.37$ ;  $p = 0.042$ ) e com a abundância ( $r = -0.40$ ;  $p = 0.027$ ), com significância estatística, indicando que estações mais profundas tendem a apresentar menores concentrações de microfitoplâncton.

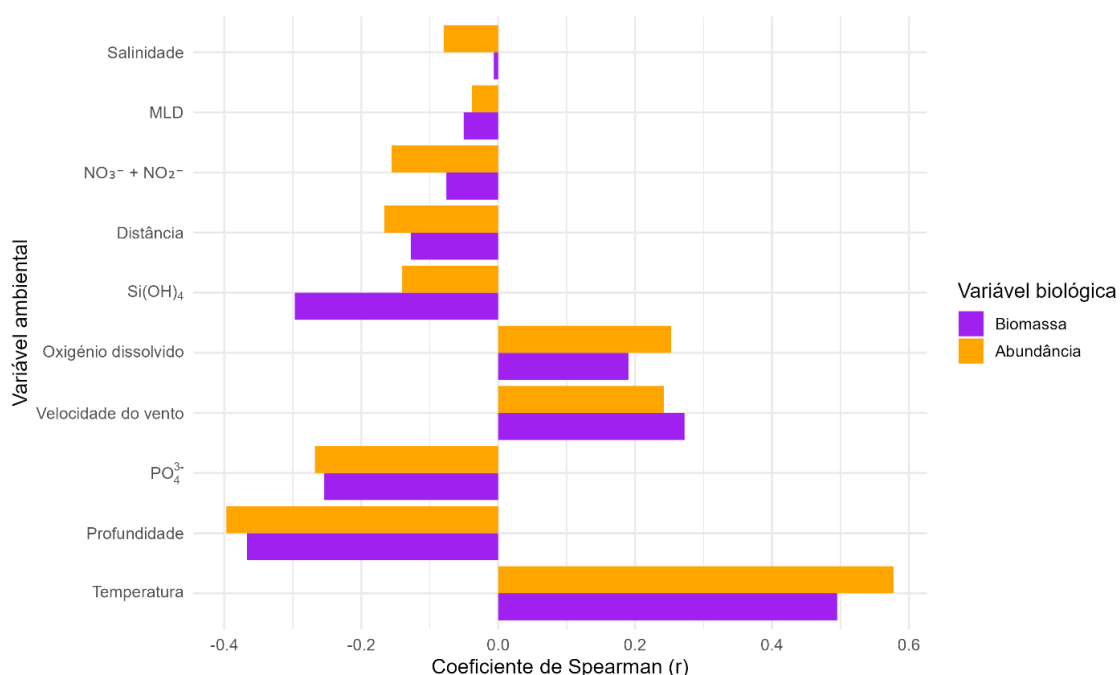
O oxigénio dissolvido exibiu correlação fraca positiva com a biomassa ( $r = 0.19$ ;  $p = 0.31$ ) e com a abundância ( $r = 0.25$ ;  $p = 0.17$ ), mas sem significância estatística.

A salinidade mostrou correlações muito fracas e não significativas com a biomassa ( $r = -0.006$ ;  $p = 0.97$ ) e com a abundância ( $r = -0.079$ ;  $p = 0.67$ ), sugerindo que este parâmetro não exerce influência relevante sobre as métricas biológicas analisadas, o que pode refletir uma relativa homogeneidade ao longo das estações amostradas.

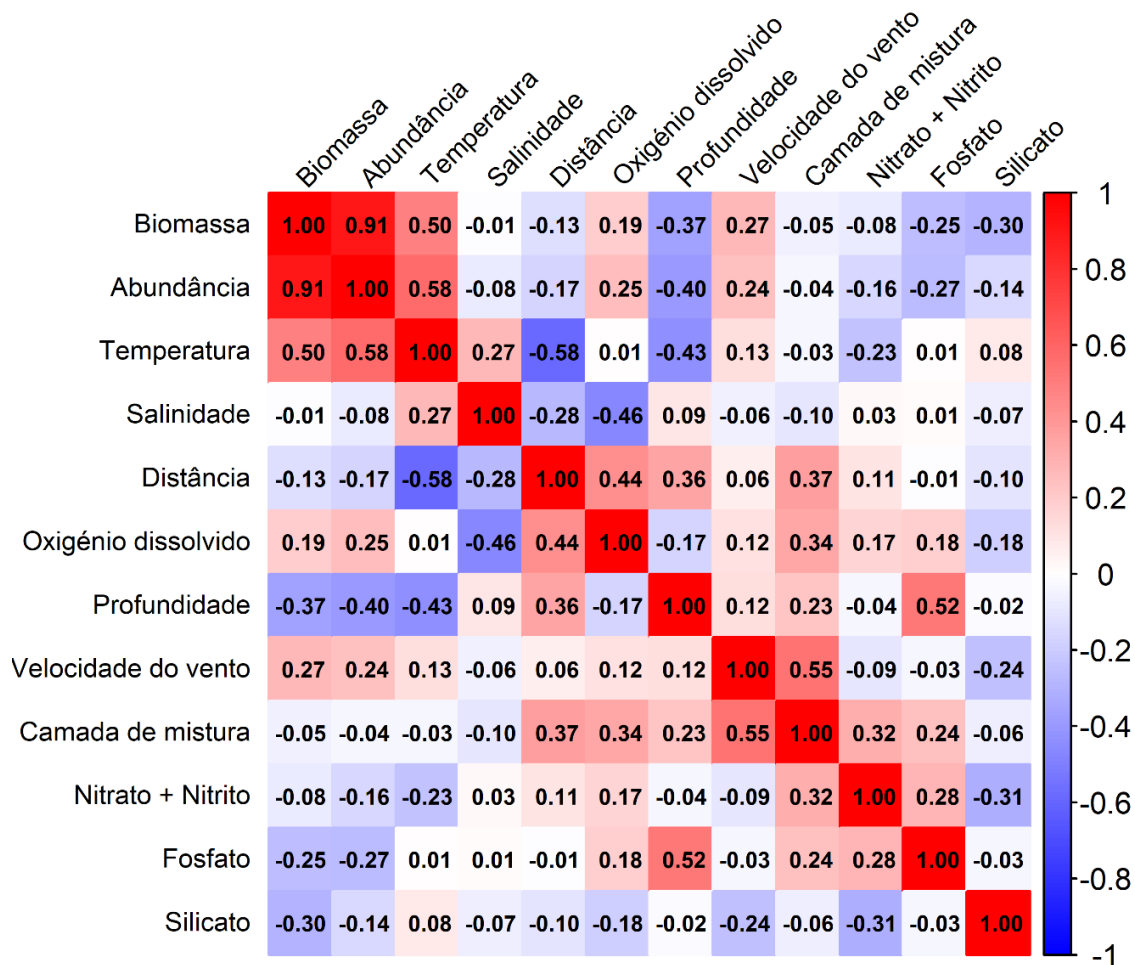
As variáveis relacionadas com os nutrientes, nomeadamente  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{Si (OH)}_4$ , apresentaram correlações fracas a muito fracas com a biomassa e a abundância, todas sem significância estatística. Estas tendências estão visualmente destacadas na Figura III-27, onde se observa o gradiente de tons azuis, indicativo de correlação negativa.

A velocidade média do vento apresentou correlação fraca positiva com a biomassa ( $r = 0.27$ ;  $p = 0.14$ ) e com a abundância ( $r = 0.24$ ;  $p = 0.19$ ), embora sem significância estatística.

A camada de mistura (MLD) evidenciou correlações muito fracas e não significativas com a biomassa ( $r = -0.05$ ;  $p = 0.79$ ) e com a abundância ( $r = -0.04$ ;  $p = 0.84$ ), sugerindo uma influência negligenciável da estratificação vertical da coluna de água sobre as variáveis biológicas, pelo menos no contexto das amostras analisadas.

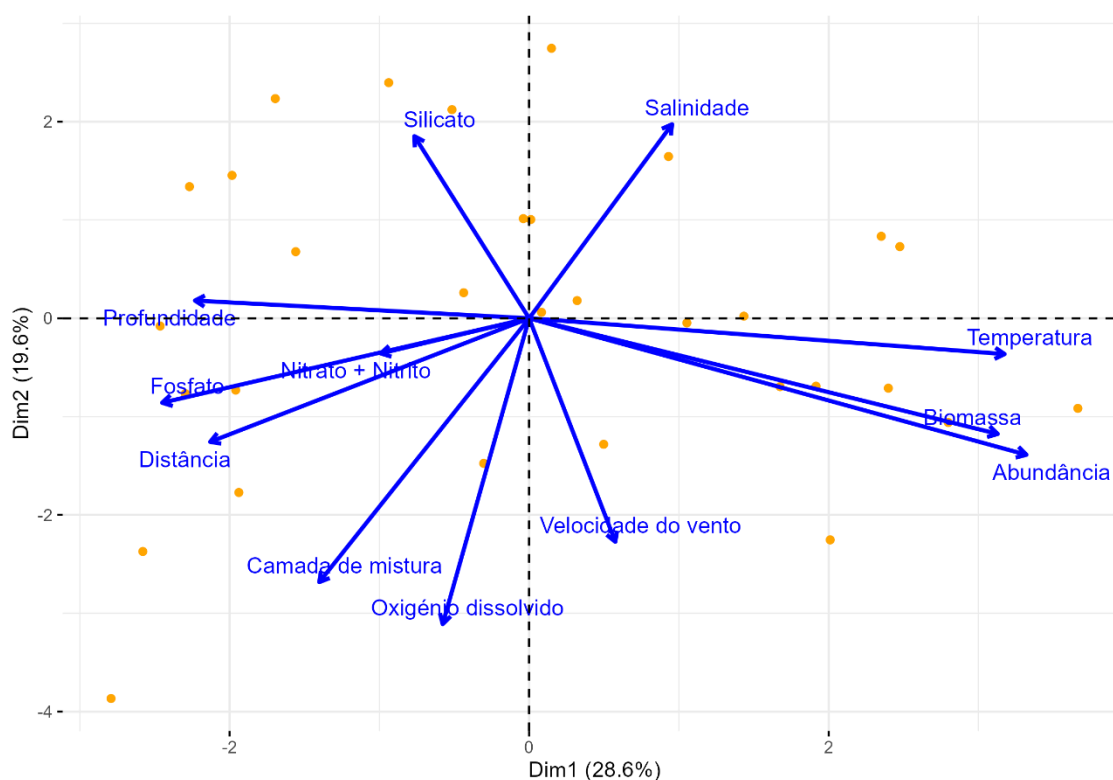


**Figura III-26:** Coeficientes de correlação de *Spearman* entre as variáveis ambientais e as variáveis biológicas (biomassa de carbono e abundância de microfitoplâncton). As barras representam a força e direção da correlação, sendo os valores positivos indicativos de correlação positiva e os negativos de correlação negativa. As cores distinguem as variáveis biológicas: laranja para a abundância e roxo para a biomassa.



**Figura III-27:** Mapa de correlação de *Spearman* entre as variáveis ambientais e as variáveis biológicas (biomassa de carbono e abundância de microfitoplâncton). O gradiente de cores representa a direção e intensidade da correlação (vermelho = positiva; azul = negativa), sendo os valores numéricos os coeficientes de *Spearman* ( $r$ ). As correlações foram consideradas significativas com base nos valores de  $p$  (cf. Tabela E-I, Anexo E e a força das correlações foi interpretada segundo *Dancey & Reidy* (2007): muito fraca ( $|r| < 0.10$ ), fraca ( $0.10 \leq |r| < 0.30$ ), moderada ( $0.30 \leq |r| < 0.50$ ), forte ( $0.50 \leq |r| < 0.70$ ) e muito forte ( $|r| \geq 0.70$ ).

A PCA (Figura III-28) permitiu explorar visualmente as relações entre as variáveis físico-químicas e as métricas biológicas, nomeadamente, a biomassa de carbono e a abundância. Os dois primeiros componentes principais explicaram 48.2% da variância total dos dados ( $Dim1 = 28.6\%$ ;  $Dim2 = 19.6\%$ ).



**Figura III-28:** *Biplot* da Análise de Componentes Principais (PCA), representando as relações entre a biomassa de carbono, a abundância de microfitoplâncton e os parâmetros físico-químicos (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, profundidade, distância à costa, velocidade média do vento, camada de mistura e nutrientes:  $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ). As setas indicam a direção e a contribuição de cada variável para os dois primeiros componentes principais (*Dim1* = 28.6% e *Dim2* = 19.6%), que explicam 48.2% da variância total dos dados. A orientação e o comprimento das setas refletem a correlação das variáveis com os componentes principais: vetores na mesma direção indicam associação positiva com o mesmo eixo, enquanto vetores em direções opostas indicam correlação negativa.  
 Nota: Os rótulos das estações foram omitidos para facilitar a visualização das variáveis.

A biomassa de carbono e a abundância de microfitoplâncton apresentam vetores próximos e alinhados no espaço multivariado, evidenciando uma forte correlação positiva entre estas duas variáveis biológicas. Ambos os vetores surgem orientados na direção oposta à dos nutrientes ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ), sugerindo uma correlação negativa.

O oxigênio dissolvido apresenta uma orientação semelhante, embora com algum desvio, indicando uma relação positiva moderada com a biomassa e a abundância. Já a temperatura coincide com os vetores dessas variáveis biológicas, reforçando a interpretação de uma relação direta entre águas mais quentes e maior atividade microfitoplanctônica, como também indicado pelas correlações de *Spearman* (cf. Tabela E-I, Anexo E).

A profundidade apresenta um vetor orientado em sentido oposto ao da biomassa e abundância, sugerindo uma correlação negativa: estações mais profundas tendem a associar-se a menores valores de biomassa e abundância, o que é coerente com a menor disponibilidade de luz e produtividade em águas mais profundas. A distância à costa também surge orientada em sentido contrário às variáveis biológicas, reforçando a tendência de maior biomassa e abundância nas estações mais costeiras.

Observou-se uma correlação positiva fraca entre a velocidade do vento e as variáveis biológicas, o que sugere que o aumento da turbulência superficial poderá favorecer a renovação de nutrientes e sustentar níveis mais elevados de microfitoplâncton. A MLD exibe uma correlação muito fraca e negativa, o que poderá indicar uma relação mais indireta, eventualmente, associada à dinâmica vertical da coluna de água.

Por fim, a salinidade exibe um vetor destacado, orientado num quadrante distinto das restantes variáveis, indicando um padrão de variação relativamente independente, com reduzido contributo para a explicação da variação conjunta da biomassa e da abundância.

#### III.5.1. Ilhas e montes submarinos e parâmetros físico-químicos

A PCA realizada com as médias das variáveis ambientais por ilha e monte submarino (Figura III-29) permitiu explorar padrões multivariados entre diferentes regiões de amostragem. Os dois primeiros componentes principais explicaram 82.2% da variância total dos dados, com PC1 a representar 54.9% e PC2, 27.3%.

A PC1 foi influenciada positivamente pela velocidade do vento, pelo oxigénio dissolvido, pelo nitrato + nitrito e pela MLD, e negativamente pelo silicato, indicando um gradiente entre ambientes mais oxigenados, enriquecidos em nutrientes e com maior mistura vertical e dinâmica atmosférica, e ambientes mais estáveis e enriquecidos em silicato.

A PC2, por sua vez, refletiu um gradiente associado a valores positivos de fosfato, temperatura e salinidade, e a valores negativos de MLD, distinguindo ambientes mais quentes, salinos e ricos em fosfato de ambientes com camadas de mistura mais profundas.

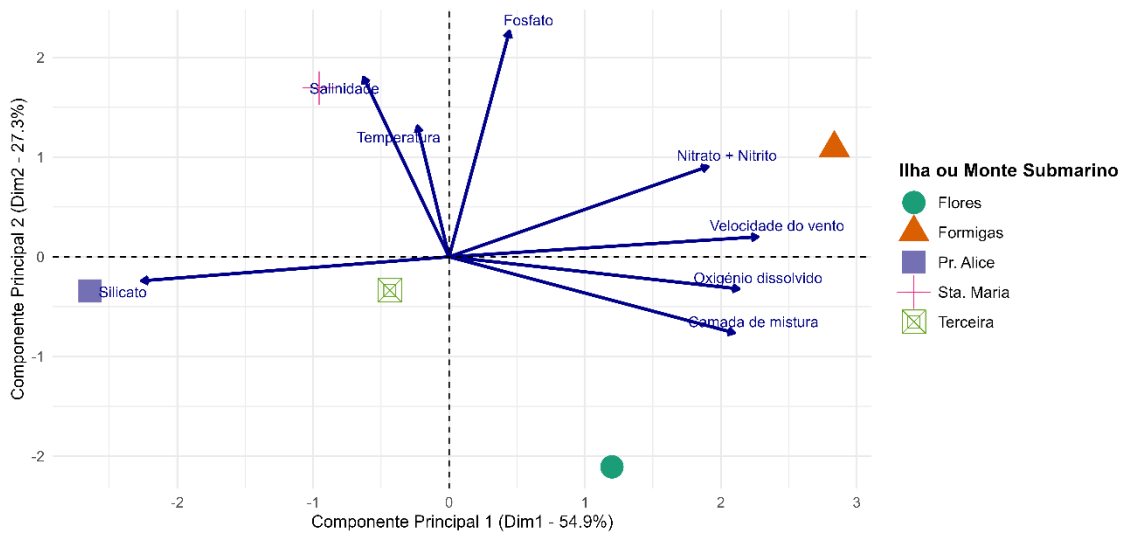
O nitrato + nitrito contribuiu de forma consistente para a variação ao longo da PC1, reforçando a sua importância na diferenciação regional. Apresentou ainda uma contribuição moderada na PC2.

A disposição das ilhas e montes submarinos no espaço da PCA (Figura III-29) sugere variações ambientais regionais. A ilha das Flores localiza-se no quadrante inferior direito, associada a concentrações mais elevadas de oxigénio dissolvido e a maiores profundidades da camada de mistura. O Banco das Formigas posiciona-se também à direita do gráfico, próximo dos vetores de nitrato + nitrito, velocidade do vento e de oxigénio dissolvido. O Banco Princesa Alice encontra-se no quadrante esquerdo, em associação com o silicato. Já as ilhas da Terceira e de Santa Maria surgem próximas do centro da ordenação, refletindo condições mais intermédias ou de transição.

Os *loadings* das variáveis nos dois primeiros componentes principais encontram-se resumidos na Tabela III-9, refletindo a força e a direção da contribuição de cada variável para a definição dos eixos multivariados.

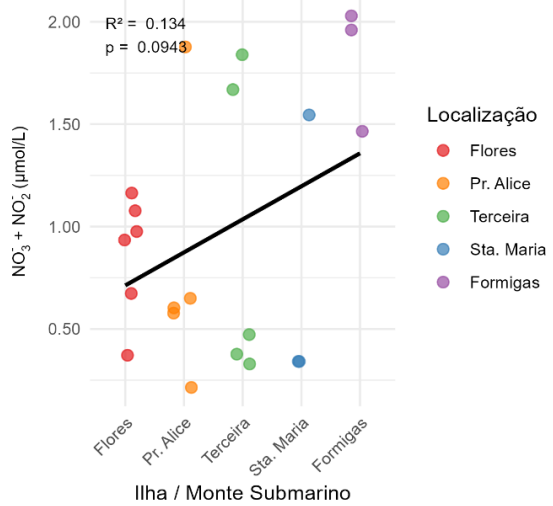
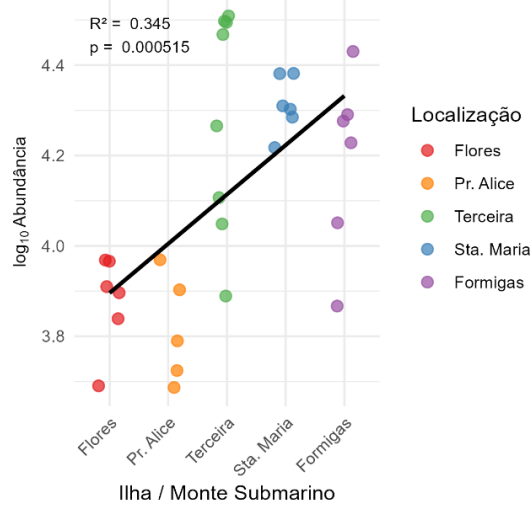
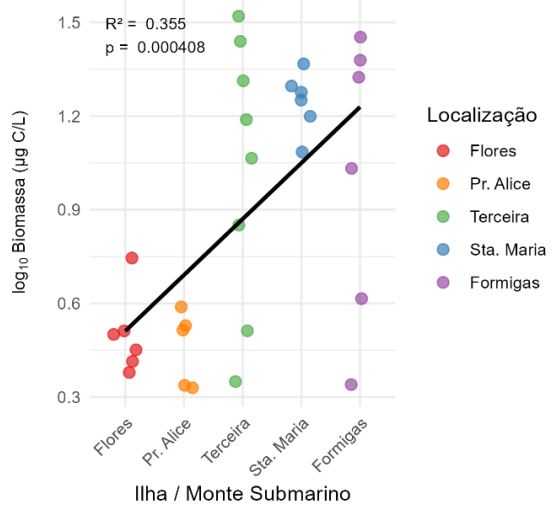
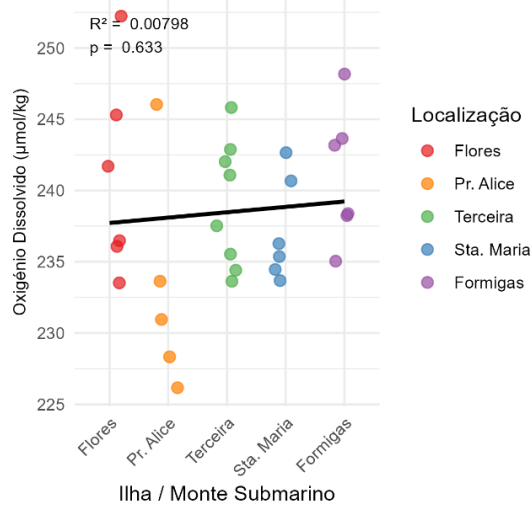
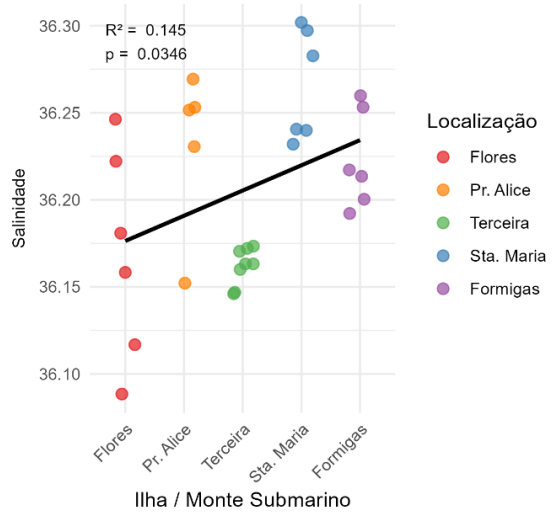
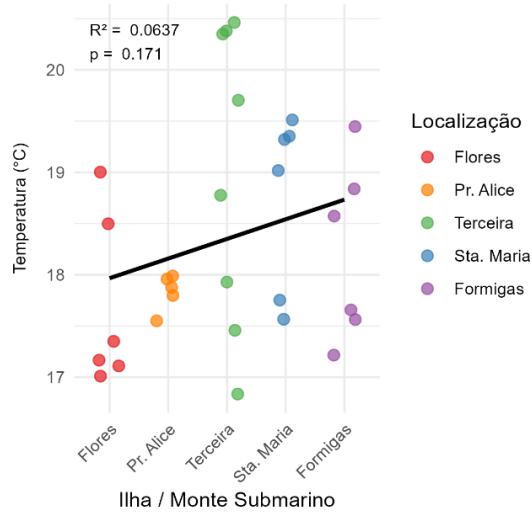
**Tabela III-9:** Cargas fatoriais (*loadings*) das variáveis ambientais nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA), calculadas com base nas médias por ilha ou monte submarino. Os valores apresentados representam a contribuição relativa de cada variável para a definição dos eixos principais. Cargas mais elevadas, positivas ou negativas, indicam uma influência mais forte da variável na orientação do respetivo componente.

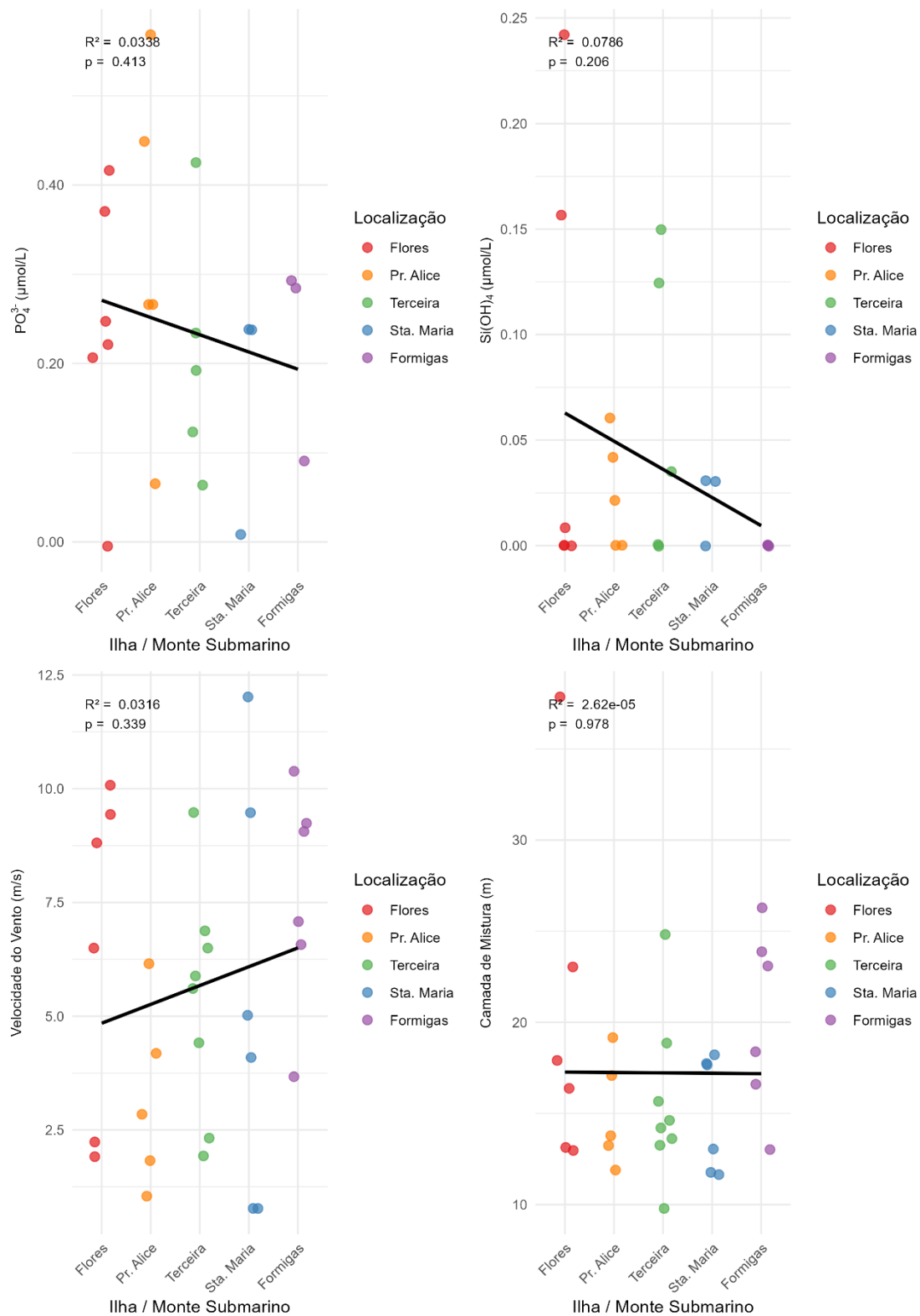
Variável	PC1	PC2
Temperatura (°C)	-0.0479	0.3839
Salinidade (PSU)	-0.13	0.5269
O <sub>2</sub> dissolvido (µmol/kg)	0.44	-0.0942
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	0.3928	0.265
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µM)	0.0915	0.6616
Si (OH) <sub>4</sub> (µM)	-0.4664	-0.0704
Velocidade do vento (m/s)	0.4685	0.0587
MLD (m)	0.433	-0.2232



**Figura III-29:** *Biplot* da Análise de Componentes Principais (PCA) baseada nas médias das variáveis ambientais por ilha ou monte submarino. Foram consideradas as seguintes: temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido, nitrato + nitrito, fósforo, silicato, velocidade média do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). As setas representam as variáveis ambientais, sendo a sua orientação e comprimento indicativos da direção e magnitude da sua contribuição para os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), que explicam 82.2% da variância total dos dados (PC1 = 54.9%; PC2 = 27.3%). Os pontos coloridos e com formas distintas representam as diferentes ilhas e montes submarinos, permitindo visualizar padrões ambientais regionais no espaço multivariado.

Para além da PCA, foram exploradas as relações entre as variáveis ambientais e biológicas e a posição geográfica das diferentes ilhas e montes submarinos dos Açores. Para cada variável, foi ajustado um modelo de regressão linear simples sobre a sequência ordinal das ilhas, ordenadas geograficamente da mais ocidental para a mais oriental (Figura III-30).





**Figura III-30:** Gráficos de dispersão entre as variáveis ambientais, físico-químicas e biológicas e as diferentes ilhas/montes submarinos. A biomassa e a abundância foram previamente transformadas por logaritmo decimal ( $\log_{10}(x + 1)$ ). Valores ausentes nos nutrientes foram imputados com a média. Para cada variável foi ajustado um modelo de regressão linear simples sobre a sequência ordinal das ilhas, ordenadas geograficamente da mais ocidental para a mais oriental. Estão representadas as linhas de tendência (a preto) e os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e de significância estatística ( $p$ ).

As análises revelaram padrões pouco consistentes ao longo do gradiente insular. A temperatura apresentou uma variação muito discreta de oeste para leste, sem alcançar significância estatística ( $R^2 = 0.064$ ;  $p = 0.1708$ ). A salinidade, por outro lado, demonstrou um ligeiro aumento ao longo do gradiente geográfico, com uma relação estatisticamente significativa ( $R^2 = 0.145$ ;  $p = 0.0346$ ).

O oxigênio dissolvido não evidenciou qualquer padrão claro em relação à ordenação espacial, apresentando um coeficiente de determinação muito baixo e um  $p$ -valor elevado ( $R^2 = 0.008$ ;  $p = 0.6326$ ).

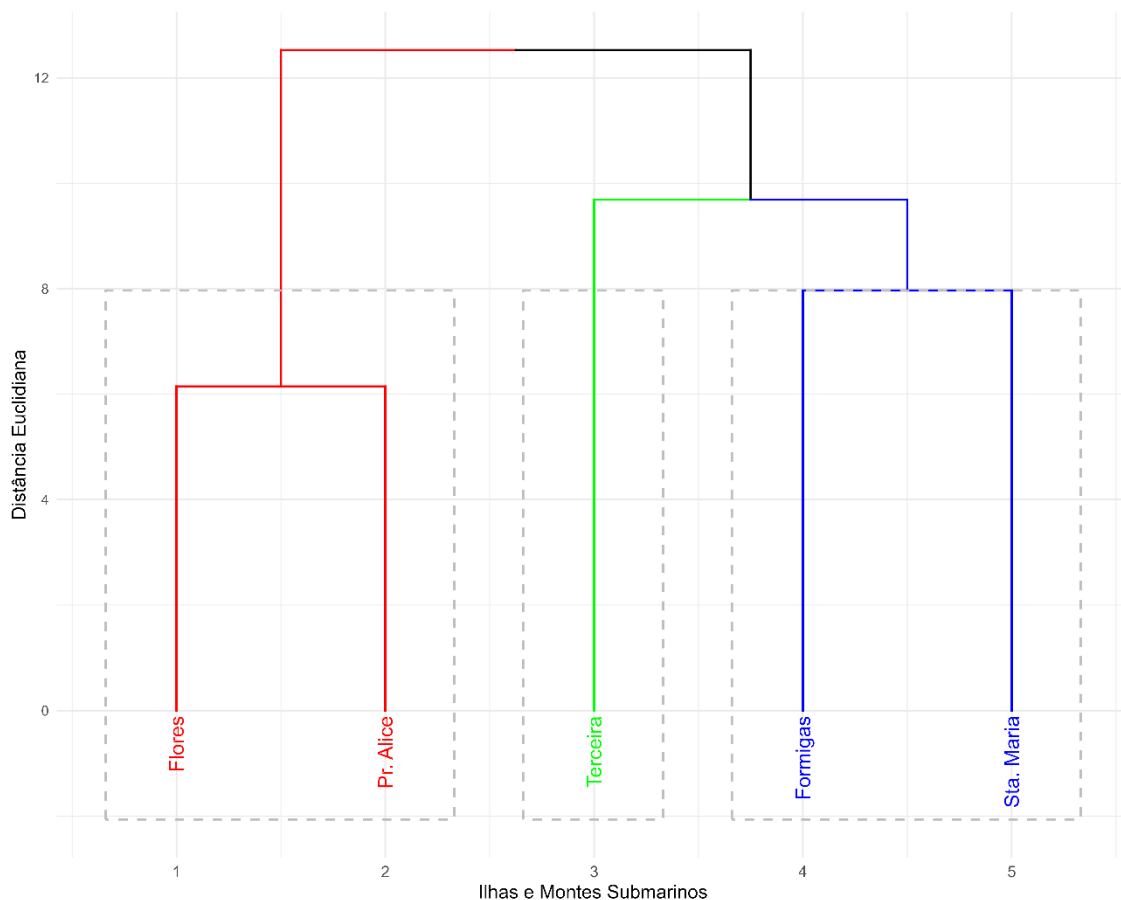
A biomassa transformada apresentou o coeficiente de determinação mais elevado entre todas as variáveis analisadas ( $R^2 = 0.355$ ;  $p = 0.0004$ ), seguida da abundância transformada ( $R^2 = 0.345$ ;  $p = 0.0005$ ), sugerindo condições mais favoráveis à produtividade nas regiões mais a leste.

Em relação aos nutrientes, o nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ) demonstrou uma tendência moderada, mas não estatisticamente significativa ( $R^2 = 0.134$ ;  $p = 0.0943$ ). Já o fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) e o silicato ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) apresentaram coeficientes de determinação baixos ( $R^2 = 0.034$  e  $0.079$ , respectivamente), sem evidência de variação sistemática com a localização geográfica ( $p > 0.20$ , em ambos os casos).

As variáveis físicas, velocidade do vento e profundidade da camada de mistura, também não apresentaram relações significativas com o gradiente geográfico ( $R^2 = 0.032$ ;  $p = 0.3386$  e  $R^2 = 0.000$ ;  $p = 0.9782$ , respectivamente) (Tabela 1-F, Anexo F).

#### III.5.1.1. Clusterização Hierárquica e Dendograma

A análise de clusterização hierárquica agrupou os locais de amostragem em três grupos principais (Figura III-31). O primeiro grupo, destacado a vermelho, incluiu a ilha das Flores e o Banco Princesa Alice, evidenciando uma elevada similaridade na composição relativa das ordens de microfitoplâncton, biomassa de carbono e parâmetros ambientais. O segundo grupo, representado a verde, correspondeu unicamente à Ilha da Terceira, que se destacou como ecologicamente distinta em relação aos restantes locais. O terceiro agrupamento, indicado a azul, integrou as ilhas de Santa Maria e o Banco das Formigas, que apresentaram elevada similaridade entre si.



**Figura III-31:** Dendrograma resultante da análise de clusterização hierárquica dos locais de amostragem (agrupados por ilha ou monte submarino), baseado na composição relativa das ordens de microfítocoplâncton, biomassa de carbono e variáveis ambientais. A matriz foi construída com dados padronizados e imputação dos valores ausentes, e a clusterização foi realizada com distância euclidiana e método de ligação *Ward.D2*. As cores representam os agrupamentos ecológicos identificados.

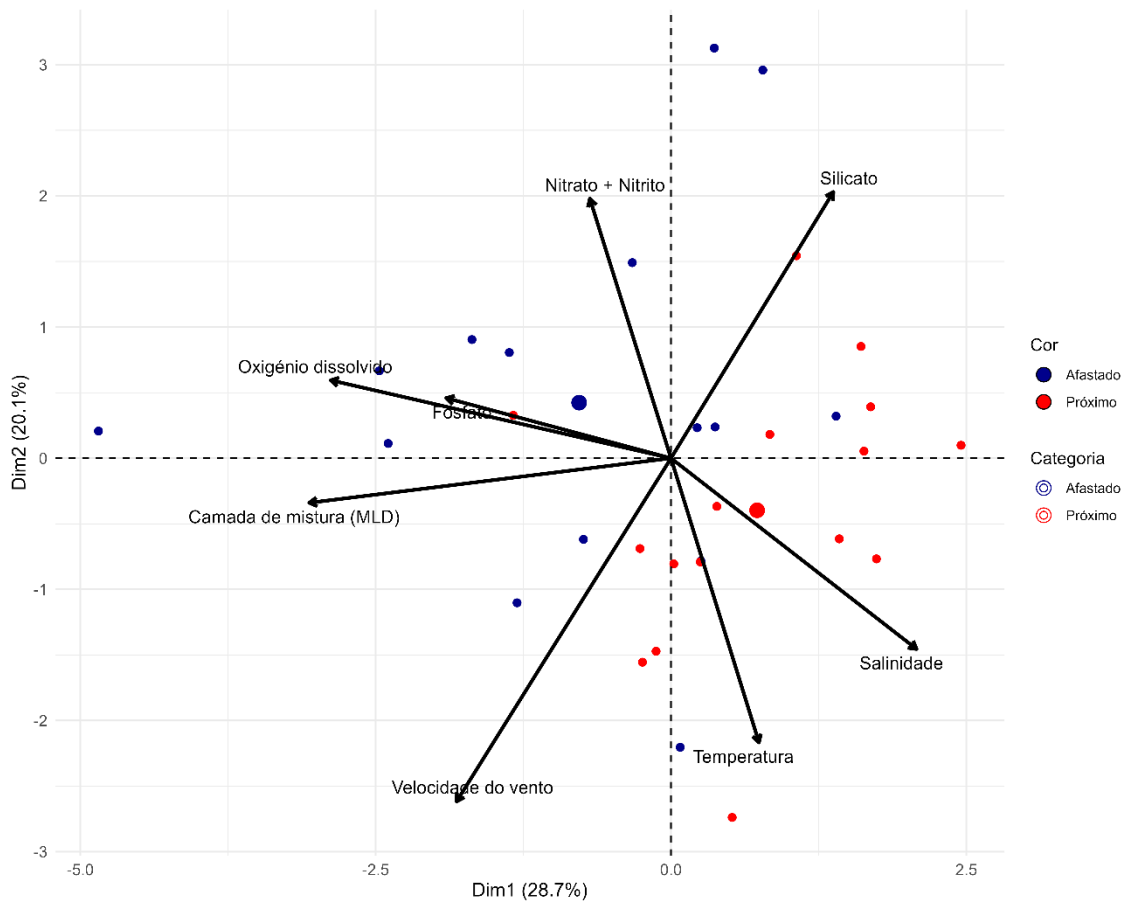
### III.5.2. Distância à costa e parâmetros físico-químicos

A PCA (Figura III-32) foi aplicada às variáveis ambientais com o objetivo de explorar os padrões de variação multivariada entre as estações amostradas, classificadas em duas categorias espaciais: “Próximo” (estações costeiras) e “Afastado” (estações oceânicas), com base na mediana da distância à costa. A análise considerou as variáveis: temperatura; salinidade; oxigénio dissolvido; nitrato + nitrito, fosfato, silicato; velocidade do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). Antes da PCA, os dados foram padronizados (*z-score*) e os valores ausentes foram imputados utilizando o método *imputePCA* do pacote *missMDA*.

A Figura III-32 ilustra a ordenação das estações de amostragem (cada ponto representa uma estação) no plano definido pelos dois primeiros componentes principais (Dim.1 e Dim.2) da análise PCA. Observa-se uma separação parcial entre os grupos, mais evidente ao longo da Dim.1, a explicar 28.7% da variância e a Dim.2 com 20.1%. Em conjunto, estes dois eixos explicaram 48.8% da variabilidade ambiental observada (Tabela III-10). A Dim.1 apresentou cargas negativas mais expressivas para a camada de mistura (-0.5428), oxigénio dissolvido (-0.5106), fosfato (-0.3371) e velocidade do vento (-0.3217), refletindo um gradiente entre águas mais turbulentas, bem oxigenadas e com mistura vertical mais profunda e águas mais estratificadas. A temperatura (+0.1320), o silicato (+0.2437) e a salinidade (+0.3685) contribuíram positivamente, ainda que de forma mais moderada. A Dim.2 apresentou as maiores cargas positivas para o silicato (+0.4291) e nitrato + nitrito (+0.4183), além de contribuições negativas da temperatura (-0.4581) e da velocidade do vento (-0.5532).

**Tabela III-10:** Cargas fatoriais (*loadings*) das variáveis ambientais nos dois primeiros componentes principais (*Dim1* e *Dim2*) da Análise de Componentes Principais (PCA). A análise foi realizada com base nas médias das variáveis ambientais: temperatura; salinidade; oxigénio dissolvido; nitrato + nitrito, fosfato, silicato; velocidade média do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). Os dados foram previamente imputados com o método *imputePCA* e padronizados (*z-score*). Os valores apresentados indicam o grau de correlação entre cada variável e os componentes principais. Cargas mais elevadas (positivas ou negativas) indicam maior influência da variável na definição do respetivo eixo.

Variável	Dim.1	Dim.2
Temperatura (°C)	0.1320341	-0.4580832
Salinidade (PSU)	0.36852034	-0.3076044
O <sub>2</sub> dissolvido (µmol/kg)	-0.5106174	0.12560943
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	-0.1217003	0.41830817
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µM)	-0.3371898	0.09695317
Si (OH) <sub>4</sub> (µM)	0.24371667	0.42912139
Velocidade do vento (m/s)	-0.3216985	-0.5532331
Camada de mistura (m)	-0.5428019	-0.0718882



**Figura III-32:** Representação da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com base nas variáveis ambientais: temperatura; salinidade; oxigénio dissolvido; nitrato + nitrito, fosfato, silicato; velocidade média do vento e profundidade da camada de mistura (MLD). Os dados foram previamente imputados com o método *imputePCA* e padronizados (*z-score*). Cada ponto representa uma amostra, categorizada como “Próximo” (estações costeiras) ou “Afastado” (estações oceânicas), com base na mediana da distância ao litoral. As setas indicam a contribuição das variáveis para os dois primeiros componentes principais: *Dim1* (28.7%) e *Dim2* (20.1%), que, em conjunto, explicam 48.8% da variância total.

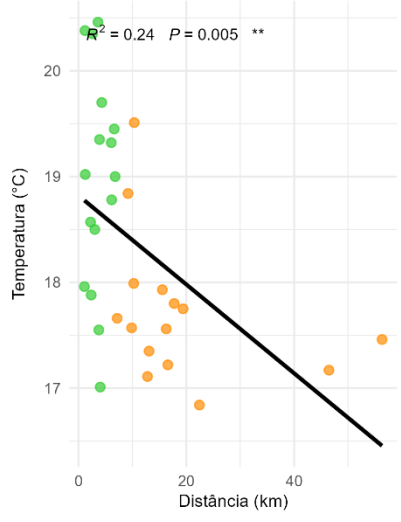
A comparação entre os dois grupos de estações revela diferenças ambientais consistentes. As estações classificadas como “Próximo” apresentaram temperaturas ligeiramente superiores (média de 19 °C) face às “Afastado” (17.7 °C), enquanto a salinidade média foi praticamente idêntica entre os grupos (~36.2 PSU). As concentrações de oxigénio dissolvido foram ligeiramente mais elevadas nas estações “Afastado” (241 µmol/kg) do que nas “Próximo” (236 µmol/kg). Em relação aos nutrientes, os valores médios de nitrato + nitrito (1.12 µmol/L), fosfato (0.29 µmol/L) e silicato (0.05 µmol/L) foram mais elevados nas estações “Afastado”. Também a velocidade média do vento e a MLD se revelaram superiores neste grupo (Tabela III-11), sugerindo um ambiente

físico mais dinâmico e, potencialmente, associado a zonas mais expostas à ação oceânica.

**Tabela III-11:** Valores médios das variáveis ambientais nas estações classificadas como “Próximo” (próximas da costa) e “Afastado” (afastadas da costa). As médias foram calculadas com base nas amostras utilizadas na Análise de Componentes Principais (PCA), após imputação dos valores ausentes.

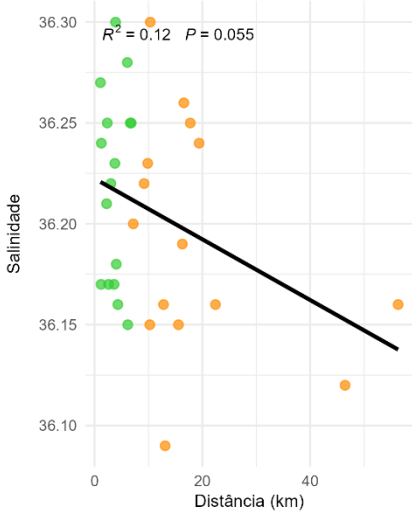
Distância	Temperatura	Salinidade	O <sub>2</sub> dissolvido	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub>	Si (OH) <sub>4</sub>	Vel. vento	MLD
Próximo	19	36.2	236	0.85	0.2	0.04	5.25	14.88
Afastado	17.7	36.2	241	1.12	0.29	0.05	6.15	19.73

A influência da distância à costa nas variáveis físico-químicas e biológicas foi também analisada através de modelos de regressão linear simples, considerando, simultaneamente, as estações das categorias espaciais “Próximo” e “Afastado”. A Figura III-33 apresenta os gráficos de dispersão com a reta de regressão ajustada ao conjunto dos dados, sendo as categorias de distância apenas distinguidas graficamente. A Tabela F-II, Anexo F, sintetiza os coeficientes de determinação, R<sup>2</sup>, e os respectivos valores de significância estatística, *p* valor.



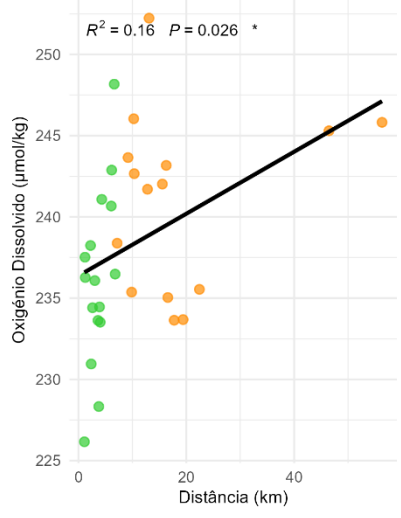
Categoria de Distância

- Afastado
- Próximo



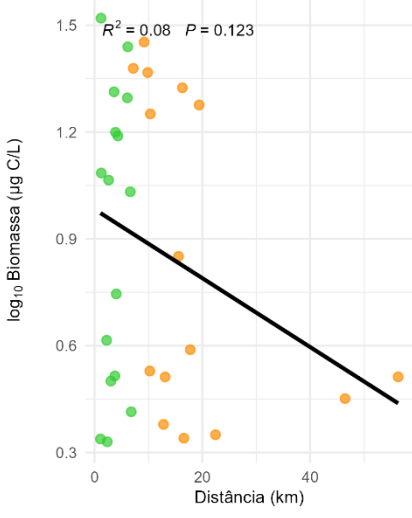
Categoria de Distância

- Afastado
- Próximo



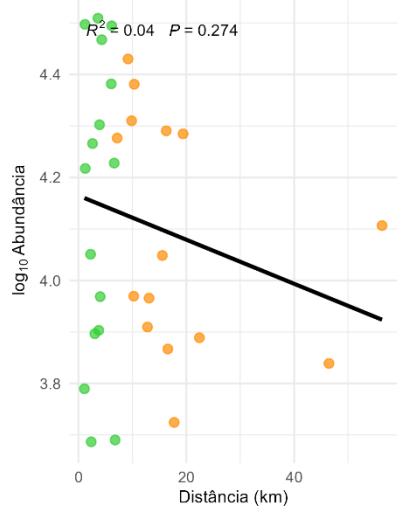
Categoria de Distância

- Afastado
- Próximo



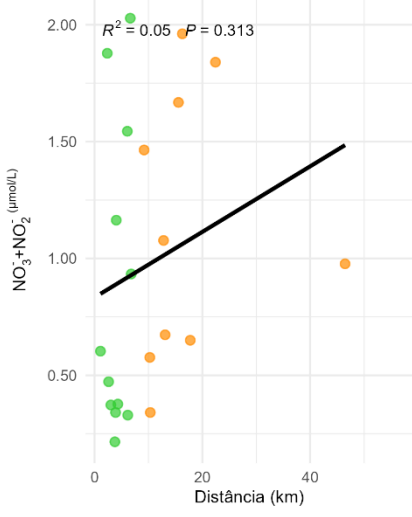
Categoria de Distância

- Afastado
- Próximo



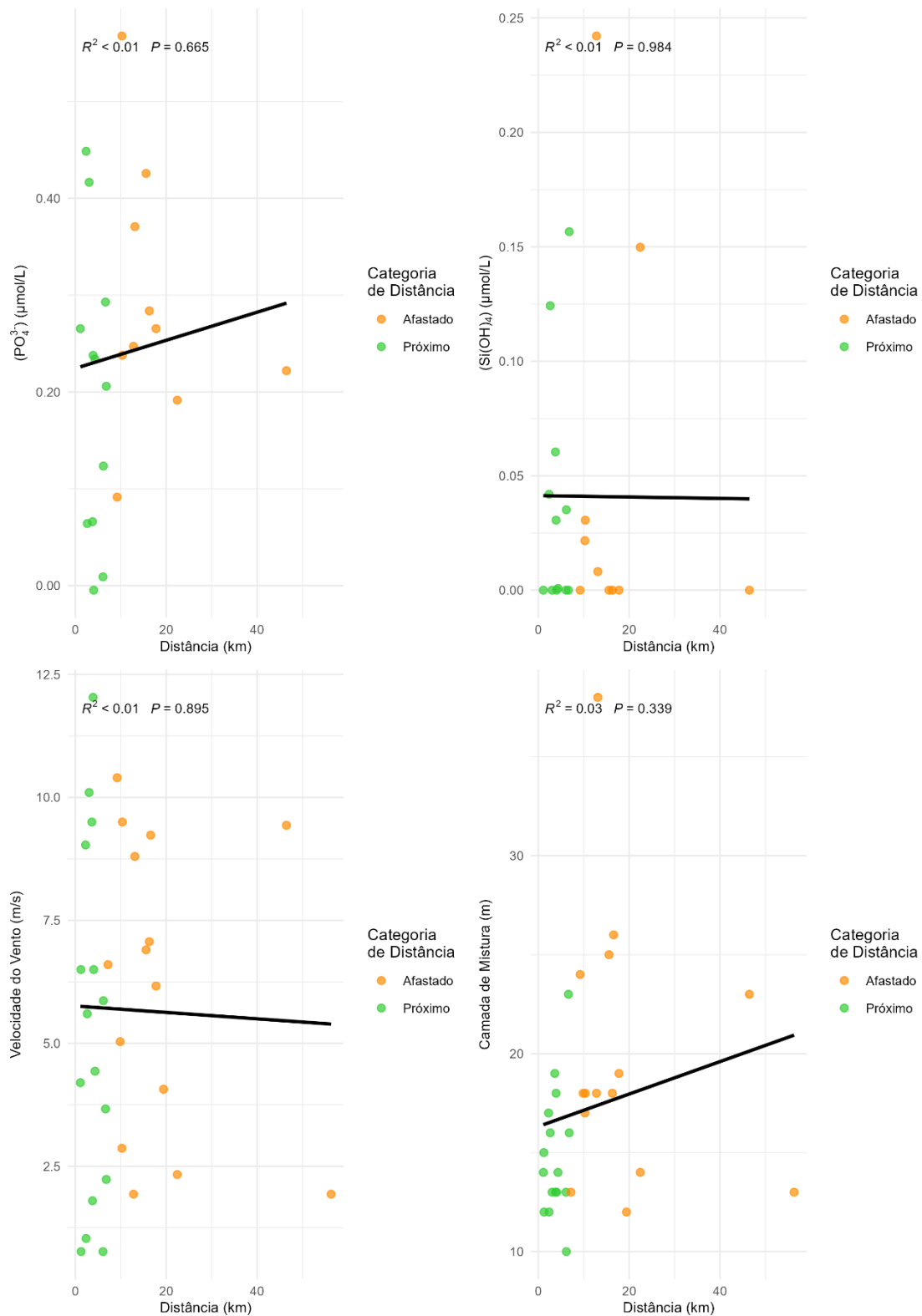
Categoria de Distância

- Afastado
- Próximo



Categoria de Distância

- Afastado
- Próximo



**Figura III-33:** Gráficos de regressão linear simples entre a distância à costa e as variáveis ambientais e biológicas analisadas. Em cada painel apresenta-se a relação entre a distância e a variável em estudo e a reta de regressão ajustada. São indicados os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da significância estatística do modelo ( $p$ -valor). A biomassa e a abundância foram previamente transformadas por logaritmo decimal ( $\log_{10}(x + 1)$ ). As categorias espaciais “Próximo” e “Afastado” encontram-se diferenciadas graficamente. As relações estatisticamente significativas, considerando  $p < 0.05$ , correspondem à temperatura e ao oxigênio dissolvido.

No geral, os modelos de regressão linear simples apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) baixos para a maioria das variáveis ambientais, físico-químicas e biológicas, indicando uma capacidade explicativa limitada da distância à costa. Contudo, algumas variáveis revelaram relações estatisticamente significativas (Tabela F-II, Anexo F e Figura III-33).

A temperatura apresentou uma relação negativa significativa com a distância, explicando cerca de 24% da variabilidade observada ( $R^2 = 0.237$ ,  $p = 0.00546$ ), evidenciando uma tendência decrescente dos valores de temperatura com o aumento da distância à costa. A salinidade mostrou uma relação fraca e marginalmente não significativa ( $R^2 = 0.121$ ,  $p = 0.0547$ ), sugerindo apenas uma tendência pouco consistente ao longo do gradiente de distância.

O oxigênio dissolvido revelou uma relação positiva e significativa com a distância ( $R^2 = 0.159$ ,  $p = 0.0262$ ), indicando um aumento dos valores com o afastamento da costa.

As variáveis biológicas, biomassa e abundância de microfitoplâncton, previamente transformadas pelo logaritmo decimal, não apresentaram relações estatisticamente significativas com a distância. Apesar de se observar ligeiras tendências decrescentes, os valores de  $R^2$  foram baixos: biomassa transformada  $R^2 = 0.08$ ,  $p = 0.123$ ; abundância transformada  $R^2 = 0.041$ ,  $p = 0.274$ , indicando um efeito reduzido da distância sobre estas variáveis.

Quanto aos nutrientes (nitrato + nitrito, fosfato e silicato), não se observaram relações lineares significativas com a distância, com coeficientes de determinação muito baixos ( $R^2 \leq 0.051$ ) e  $p$ -valores elevados, sugerindo ausência de associação linear clara. De igual modo, a velocidade do vento e a profundidade da camada de mistura não evidenciaram relações estatisticamente significativas, apresentando  $R^2$  reduzidos e  $p$ -valores elevados.

Em síntese, os resultados indicam que a distância à costa exerce influência estatisticamente significativa apenas sobre a temperatura e o oxigênio dissolvido, enquanto as restantes variáveis ambientais e biológicas analisadas não apresentam associações lineares significativas ao longo do gradiente de distância considerado.

## IV. Discussão dos Resultados

### IV.1. Colheita de amostras e análise do microfitoplâncton

No presente estudo, as amostras foram colhidas, no início do outono de 2018, à profundidade da DCM, situada entre os 40 e os 100 m, sendo os 65 metros a profundidade mais frequentemente registada nas estações analisadas. Esta DCM encontra-se de acordo com os valores descritos por Botelho (2014) e Brotas *et al.* (2023) para o outono, nos Açores. Salienta-se que os estudos realizados no outono são menos frequentes, havendo uma lacuna de informação sobre a profundidade da DCM, nesta estação. Esta camada constitui, muitas vezes, um reservatório de biomassa, alimentado, sobretudo, por nutrientes regenerados, e apresenta uma comunidade adaptada a baixos níveis de luz, com elevada eficiência fotossintética (Fennel & Boss, 2003; Marañón, 2015; Mignot *et al.*, 2014). A acumulação de microfitoplâncton nessa camada deve-se também à redução da pressão de predação por parte do microzooplâncton, que é menos eficaz em zonas mais profundas e com menor luminosidade (Arístegui *et al.*, 2009). A acumulação de biomassa em profundidade representa uma adaptação do fitoplâncton às limitações da superfície, sendo um componente chave da produtividade em sistemas como o dos Açores (Letelier *et al.*, 2004; Marañón, 2015).

A análise microscópica das comunidades microfitoplanctónicas foi realizada com base no método de sedimentação de Utermöhl, muito utilizado em estudos de monitorização pela sua fiabilidade na quantificação de células em amostras preservadas (Edler & Elbrächter, 2010). No entanto, este método apresenta algumas limitações: exige tempo e dedicação, pressupõe conhecimento especializado em taxonomia e está sujeito a erros, sobretudo, quando aplicado a células pequenas ou de formas irregulares (Vadrucci *et al.*, 2018). Este processo é, igualmente, sensível a erros decorrentes da preservação — que pode causar encolhimento celular variável entre espécies (Menden-Deuer *et al.*, 2001; Montagnes *et al.*, 1994) — e à fase do ciclo celular (Hillebrand *et al.*, 1999). Relativamente ao tempo de preservação de amostras fixadas com formaldeído ou outro componente químico, McDermott & Raine (2010) asseguram a sua integridade durante um longo período. Os halos de luz gerados

durante a observação microscópica também podem comprometer a medição de células pequenas, embora este efeito possa ser atenuado com o aumento de ampliação (Cornet-Barthaux *et al.*, 2007; Montagnes *et al.*, 1994). Apesar da existência de muitas fontes potenciais de variabilidade, desde a amostragem inicial até às análises estatísticas, a aplicação consistente de protocolos padronizados contribuiu para minimizar os enviesamentos (Hallegraeff *et al.*, 1995; Sournia, 1978). A utilização de bases de dados como a de Leblanc *et al.* (2012) também permitiu validar os valores obtidos localmente e contextualizar os resultados no espectro global de variação morfológica das diatomáceas. De uma forma geral, a estratégia metodológica aplicada neste estudo pretendeu alcançar o compromisso entre a exigência analítica e a viabilidade operacional, permitindo caracterizar com fiabilidade a biomassa e a composição taxonómica do microfitoplâncton nas águas dos Açores.

## IV.2. Estrutura e biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas e parâmetros físico-químicos

Os resultados obtidos no presente estudo mostram uma elevada variabilidade espacial na abundância e biomassa de carbono do microfitoplâncton (diatomáceas e dinoflagelados) no conjunto das 31 estações amostradas refletindo a heterogeneidade ambiental da província oligotrófica do NAST. A média da abundância foi de 15 487 cél. L<sup>-1</sup>, e a biomassa média de carbono foi de 10.4 µg C L<sup>-1</sup>, ambas com elevados desvios padrão, o que aponta para uma elevada dispersão dos valores entre estações (*cf.* Tabela III-1, Figura III-4). Esta variabilidade é comum em regiões oceanográficas dominadas por processos físicos como frentes, remoinhos e interação com estruturas topográficas, como os montes submarinos (Bashmachnikov *et al.*, 2004a; Brotas *et al.*, 2013, 2022; Falkowski *et al.*, 1991; Henson *et al.*, 2011; Letelier *et al.*, 2004; McGillicuddy *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2013).

A biomassa média de carbono obtida no presente estudo (10.41 µg C L<sup>-1</sup>) está de acordo com os valores característicos da província oligotrófica do NAST. Para fazer uma comparação de biomassas com outros trabalhos, foi necessário ter em conta as semelhanças entre as metodologias utilizadas e as características oceanográficas do local em estudo (Santos *et al.*, 2013),

aplicando a razão entre o carbono e a clorofila *a* (C:Chl *a*) que é muito utilizada como método indireto para estimar a biomassa fitoplanctónica, sobretudo, entre estudos que medem apenas a clorofila, dada a sua quantificação mais simples (Cloern *et al.*, 1995; Geider, 1987; Sathyendranath *et al.*, 2009) e os que fazem a quantificação da biomassa de carbono, como o presente, menos frequentes.

Estudos anteriores realizados no NAST indicam que a biomassa fitoplanctónica pode situar-se entre 5 e 25  $\mu\text{g C L}^{-1}$ , com base em estimativas derivadas de concentrações de clorofila e relações entre C:Chl *a*, dependendo das condições sazonais, nutricionais e hidrodinâmicas locais. Silva *et al.* (2013) reportaram concentrações de clorofila *a* entre 0.04 e 0.55  $\text{mg m}^{-3}$ , com um máximo de 0.86  $\text{mg m}^{-3}$ . Aplicando uma razão C:Chl *a* entre 50 e 60, esses valores correspondem a uma biomassa de carbono estimada entre 2 e 51.6  $\mu\text{g C L}^{-1}$ , intervalo que contextualiza a média observada no presente trabalho. Os estudos de Brotas *et al.* (2013) também indicam valores reduzidos de clorofila *a* nas águas do arquipélago, geralmente inferiores a 0.5  $\text{mg m}^{-3}$ , o que, por conversão, corresponderia a biomassa de carbono entre, aproximadamente, 10 e 30  $\mu\text{g C L}^{-1}$ . Mais recentemente, Brotas *et al.* (2023) reforçam este padrão oligotrófico, descrevendo a predominância de picofitoplâncton e flagelados de pequeno tamanho na região dos Açores, especialmente, em áreas afastadas da costa. As concentrações de clorofila *a* observadas nesse estudo situaram-se também abaixo de 0.5  $\text{mg m}^{-3}$ , alinhando-se com as estimativas anteriores de biomassa de carbono na ordem dos 10 a 25  $\mu\text{g C L}^{-1}$ . No entanto, a aplicação desta razão é altamente variável, dependendo de fatores como o estado fisiológico das células, a disponibilidade de luz e nutrientes, a temperatura, a espécie dominante e a fase do ciclo de crescimento (Behrenfeld *et al.*, 2005; Heinrichs *et al.*, 2024; Sosik *et al.*, 2001). Em situações de stresse nutricional, a razão pode aumentar, enquanto em condições ideais pode baixar significativamente, chegando a valores de cerca de 20 (Behrenfeld & Boss, 2003; Geider *et al.*, 1997). Esta variabilidade implica que, aquando da aplicação de uma razão fixa (por exemplo, 50–60), se deve ter em consideração o contexto ecológico. A clorofila *a* não representa uniformemente o conteúdo de carbono entre espécies ou em diferentes condições ambientais, podendo a razão C:Chl variar até cinco vezes dentro da mesma população (Sosik & Olson, 2002). Como a clorofila reflete apenas o conteúdo pigmentado, pode conduzir a

subestimações ou sobrestimações da biomassa real. Pese embora esta situação, o uso da razão C:Chl *a* é útil para comparar estudos com métricas distintas, permitindo a harmonização de dados, sendo muito utilizada em investigações de larga escala e modelos de produtividade oceânica (Buitenhuis *et al.*, 2013; Marañón *et al.*, 2001; Sathyendranath *et al.*, 2009). A consistência entre os resultados do presente estudo e os da literatura, mesmo com esta aproximação, confirma que, apesar da baixa disponibilidade de nutrientes, a região do NAST mantém níveis de biomassa coerentes com as suas dinâmicas física e biogeoquímica. No entanto, a conversão de clorofila para carbono deve ser acompanhada de informação contextual para assegurar que as interpretações ecológicas permanecem válidas (Geider, 1987; Marañón *et al.*, 2001).

De acordo com Marañón *et al.* (2003), em regiões oligotróficas como o NAST a biomassa fitoplanctónica nem sempre reflete diretamente a produtividade primária, dada a elevada eficiência fotossintética e a capacidade de reciclagem dos nutrientes por parte das comunidades presentes.

Saliente-se que o valor de biomassa de  $10.41 \mu\text{g C L}^{-1}$  refere-se apenas à biomassa média do microfitoplâncton, enquanto os valores de referência disponíveis na literatura correspondem à biomassa total do fitoplâncton, incluindo nano e picofitoplâncton. Trata-se de uma aproximação que deve ser interpretada com cautela, mas, devido à escassez de dados, especificamente, dirigidos ao microfitoplâncton, foi a comparação mais adequada possível.

A análise da biomassa de carbono atribuível ao microfitoplâncton, localizado, especialmente, na DCM aqui realizada, representa um contributo inédito e pioneiro para a caracterização das comunidades fitoplanctónicas da região, uma vez que a maioria dos estudos existentes sobre as comunidades fitoplanctónicas são à superfície do oceano. Em áreas oligotróficas como o Arquipélago dos Açores, o microfitoplâncton é responsável por, aproximadamente 10–15% da biomassa total de carbono do fitoplâncton, predominando o nanofitoplâncton e picofitoplâncton nas frações restantes (Leblanc *et al.*, 2012; Queiroz *et al.*, 2015). Os resultados expostos nesta dissertação evidenciam o papel limitado, mas consistente, do microfitoplâncton na estrutura da comunidade e na dinâmica de carbono em regiões oligotróficas,

sublinhando a importância de abordagens específicas que considerem a contribuição de diferentes frações de tamanho para a biomassa total.

A partir das análises multivariadas efetuadas, observou-se que a biomassa e a abundância de microfitoplâncton mostraram uma associação positiva muito forte ( $r = 0.91$ , *cf.* Figura III-27), o que também foi refletido no alinhamento dos vetores correspondentes na PCA (*cf.* Figura III-28). Entre os fatores ambientais, a temperatura destacou-se com correlações positivas moderadas a fortes com ambas as variáveis biológicas ( $r = 0.50$  a  $0.58$ , Tabela E-I, Anexo E; Figura III-26), surgindo igualmente alinhada no espaço multivariado, indicando que águas mais quentes favoreceram a produtividade, em linha com estudos anteriores (Bissinger & Montagnes, 2008; Eppley, 1977; Fernández-González *et al.*, 2022; Heinrichs *et al.*, 2024).

A profundidade e a distância à costa apresentaram correlações negativas com a biomassa e a abundância, com significância estatística no caso da profundidade. Esta tendência foi também observada na PCA, onde os seus vetores se opuseram aos das variáveis biológicas, sugerindo que águas mais profundas e afastadas da costa tendem a apresentar menor densidade e biomassa microfitoplanctónica, talvez devido a menor luz ou menor disponibilidade de nutrientes (Arístegui *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2013). Já os nutrientes inorgânicos dissolvidos ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{Si(OH)}_4$ ) apresentaram correlações fracas e não significativas com a biomassa e abundância, padrão típico de sistemas onde os nutrientes são rapidamente assimilados ou onde a produtividade não é diretamente controlada pela sua concentração instantânea (Marañón *et al.*, 2001). Na análise da PCA, estes nutrientes surgiram com vetores orientados em sentido oposto às variáveis biológicas, reforçando a hipótese de que as áreas mais produtivas exibem sinais de depleção nutricional após episódios de crescimento (Behrenfeld & Boss, 2014).

O oxigénio dissolvido, embora sem correlação estatisticamente significativa, mostrou alinhamento com a biomassa e a abundância na PCA, sugerindo uma possível ligação à produção primária recente (Körtzinger *et al.*, 2008).

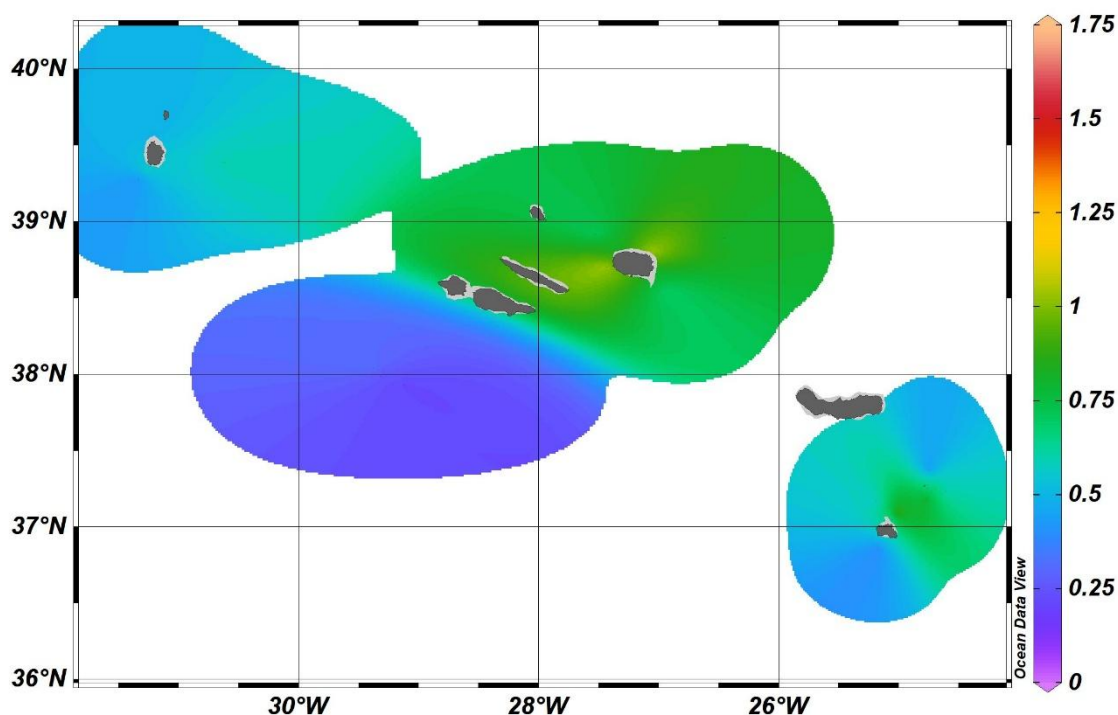
A salinidade, a velocidade do vento e a camada de mistura (MLD) revelaram fraca ou nula correlação com as variáveis biológicas, tanto nas análises bivariadas como na PCA, sugerindo um papel secundário no controlo

da biomassa neste contexto oligotrófico. No conjunto, os dados indicam que a variação espacial da produtividade microfitoplanctónica nos Açores é afetada, principalmente, por gradientes de temperatura, profundidade e posição relativa à costa.

### IV.3. Estrutura e biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas e parâmetros físico-químicos nas ilhas e montes submarinos

A assimetria positiva dos dados de biomassa e abundância, com medianas inferiores às médias, sugere a ocorrência de eventos de elevada produtividade localizados, que aumentaram os valores médios e contribuíram para a heterogeneidade observada. As estações associadas às ilhas de Santa Maria e da Terceira, bem como ao Banco das Formigas, apresentaram valores superiores de abundância e biomassa (*cf.* Figuras III-12 e III-14), indicando que estas regiões podem ser influenciadas por condições oceanográficas mais favoráveis, como maior disponibilidade de nutrientes ou maior eficiência na retenção e recirculação local (Barcelos e Ramos *et al.*, 2017; Botelho, 2014; Raimbault *et al.*, 1993). Estes padrões são coerentes com os dados de fluorescência *in situ* à profundidade dos 65 m e sugerem a atuação de mecanismos de enriquecimento local compatíveis com o efeito de massa de ilha (Aristegui *et al.*, 2009; Basterretxea *et al.*, 2002) (Figura IV.1).

### Fluorescence [ $\mu\text{g/L}$ ] @ Pressure [dbar]=65.00



**Figura IV-1:** Distribuição da clorofila *a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) obtida através de um fluorímetro, previamente calibrado, a 65 *dbar* de pressão (~65 m de profundidade), durante a campanha oceanográfica a bordo do navio de investigação *RV METEOR* na região do Arquipélago dos Açores. Os valores mais elevados de fluorescência, interpretados como *proxy* da concentração de clorofila *a*, observam-se nas proximidades das ilhas do grupo central e oriental (Terceira, Santa Maria e Banco das Formigas).

Os valores médios de abundância e de biomassa de carbono observados neste estudo, através de gráficos e de *boxplots* bem como de análises multivariadas como a PCoA (*cf.* Figuras III-16 e III-17) revelaram um padrão espacial marcado, com valores mais elevados, para ambas as métricas, nas regiões central e oriental do arquipélago dos Açores. As estações das Flores e do Banco Princesa Alice agruparam-se num extremo do espaço multivariado da PCoA, enquanto Formigas, Santa Maria e Terceira se situaram no extremo oposto, evidenciando a separação em termos de composição taxonómica. O eixo PCoA1 explicou 66.03% da variância e o eixo PCoA2, 14.1% (*cf.* Figura III-17). A PERMANOVA ( $p$ -valor = 0.002) e o teste de *Kruskal-Wallis* ( $p$ -valor = 0.009155) indicaram diferenças estatisticamente significativas na abundância e biomassa de carbono, respetivamente, entre as ilhas e montes submarinos. A biomassa de carbono em Santa Maria foi de  $16.96 \mu\text{g C L}^{-1}$ , Formigas de  $14.08 \mu\text{g C L}^{-1}$  e da Terceira,  $14.11 \mu\text{g C L}^{-1}$ . Nas regiões ocidentais, esses valores foram muito mais

inferiores, com Flores com  $2.30 \mu\text{g C}\cdot\text{L}^{-1}$  e Princesa Alice,  $1.97 \mu\text{g C}\cdot\text{L}^{-1}$  (Figura III-14). Estes resultados sugerem que a diversidade específica do microfitoplâncton nos Açores é influenciada por fatores regionais, apresentando-se mais elevada nas zonas central e oriental, onde as condições ambientais parecem ser mais favoráveis à diversidade. Esta tendência é corroborada pelos índices de diversidade ecológicos (*cf.* Tabela III-5 e Figura III-19), bem como pela análise de agrupamento hierárquico refletida no dendrograma (*cf.* Figura III-31). A distribuição geral obtida reforça a tendência de maiores valores de biomassa nas ilhas central e orientais, possivelmente, associada à estabilidade da coluna de água, retenção local de nutrientes e maior eficiência na assimilação do microfitoplâncton, apesar da baixa concentração de nutrientes dissolvidos. Boehlert (1988) sublinha que as respostas ecológicas a estes mecanismos variam consoante a morfologia do monte submarino ou ilha, a profundidade da crista, o regime de estratificação local e a direção das correntes dominantes. Estudos mais recentes reforçam estas conclusões, demonstrando que a morfologia, a profundidade da crista e a estratificação influenciam bastante a retenção e o enriquecimento local de biomassa fitoplanctónica (Leitner *et al.*, 2020), e que as interações entre correntes dominantes e topografia podem gerar zonas de elevada produtividade, com implicações na teia trófica (Mendonça *et al.*, 2012).

A análise da composição taxonómica das amostras revela uma dominância das diatomáceas sobre os dinoflagelados, tanto em termos de abundância como de biomassa (*cf.* Figuras III-5, III-6, III-9, III-10, III-13 e III-15), um padrão consistente com o observado noutras regiões subtropicais durante períodos de maior estabilidade da coluna de água e disponibilidade de nutrientes silicatados (Agustí & Duarte, 1999; Teira *et al.*, 2005). Esta dominância foi evidente nas estações da Terceira, Santa Maria e Formigas, onde ordens como Rhizosoleniales e Thalassiosirales, bem como grupos tradicionalmente classificados como Centrales e Pennales, apresentaram os maiores contributos para a biomassa total (*cf.* Figuras III-7 e III-11). Esta composição sugere condições locais favoráveis a formas de crescimento rápido, geralmente, associadas a pulsos de nutrientes e elevada biomassa, um padrão típico descrito em ecossistemas oligotróficos durante eventos de enriquecimento (Brotas *et al.*, 2013, 2022; De Queiroz *et al.*, 2015). De facto, em giros oligotróficos como o

Atlântico Norte subtropical, eventos episódicos de enriquecimento — frequentemente ligados à interação entre a circulação regional e a batimetria insular ou de montes submarinos — podem desencadear *blooms* temporários dominados por Rhizosoleniales, muitas vezes, em associação com simbiontes fixadores de azoto (Dore *et al.*, 2008; Follett *et al.*, 2018). A presença de Thalassiosirales é relevante, uma vez que esta espécie demonstra elevada tolerância à limitação crónica de ferro e à elevada radiação, características típicas de regiões oligotróficas (Lommer *et al.*, 2012). Estes traços ecológicos conferem vantagem competitiva a estas ordens relativamente aos dinoflagelados, principalmente, em períodos de disponibilidade episódica de nutrientes, comuns no final do verão e início do outono, quando a mistura superficial é mais pronunciada e a profundidade da DCM se ajusta à estratificação (Follett *et al.*, 2018). Já os dinoflagelados exibiram menores valores de biomassa e uma distribuição relativamente homogénea entre as estações, o que poderá indicar uma menor capacidade competitiva em condições de maior turbulência ou limitação específica de nutrientes (Castellani & Edwards, 2017). Algumas ordens como Peridinales e Gymnodinales registaram ligeira relevância em zonas como o Banco Princesa Alice e a ilha das Flores, mas sem dominância ecológica. Apesar dos dinoflagelados serem mais abundantes nestas duas regiões, são as diatomáceas que mais contribuem para a biomassa de carbono — sobretudo as Pennales, Centrales, Rhizosoleniales e Thalassiosirales, nas ilhas da Terceira, Santa Maria e no Banco das Formigas; e, igualmente, nas ilhas das Flores e no Banco da Princesa Alice. A elevada representatividade de categorias não identificadas como NI-UDiatom, NI-UPOB, NI-UDino, NI-UPOA e NI-HGS, tanto em abundância como em biomassa, destaca uma lacuna taxonómica neste estudo e reforça a importância de abordagens integradas, combinando morfologia e genética, para a correta identificação e compreensão ecológica de grupos ainda pouco caracterizados. Santos *et al.* (2013) observaram diferenças regionais na distribuição das diatomáceas entre o grupo ocidental, central e oriental, refletindo a influência da hidrodinâmica local, profundidade, exposição ao vento, proximidade das ilhas e batimetria, com a composição taxonómica das comunidades a revelar a dominância de ordens como Centrales, Rhizosoleniales, Thalassiosirales e Pennales.

Os resultados de Narciso *et al.* (2022), baseados na mesma campanha oceanográfica M150 *BIODIAZ*, mas centrada no estudo dos coccolitóforos (grupo dominante do nanofitoplâncton), convergem com os padrões observados no presente estudo sobre o microfitoplâncton. Em ambas as investigações, destacam-se as regiões orientais do arquipélago, como Santa Maria e o Banco das Formigas, pela elevada abundância e concentração de organismos fitoplanctónicos. No caso dos coccolitóforos (Narciso *et al.*, 2022), as Formigas registaram a maior abundância observada (79 790 células L<sup>-1</sup>), valor que vai ao encontro dos picos de biomassa e abundância de microfitoplâncton registados na mesma região. Santa Maria também apresentou elevados contributos em ambos os estudos, enquanto a ilha das Flores se evidenciou por valores bastante mais baixos. Esta correspondência espacial reforça a consistência dos padrões biológicos detetados, sugerindo que os processos físicos que afetam a produtividade primária se manifestam de forma coerente em diferentes componentes do fitoplâncton.

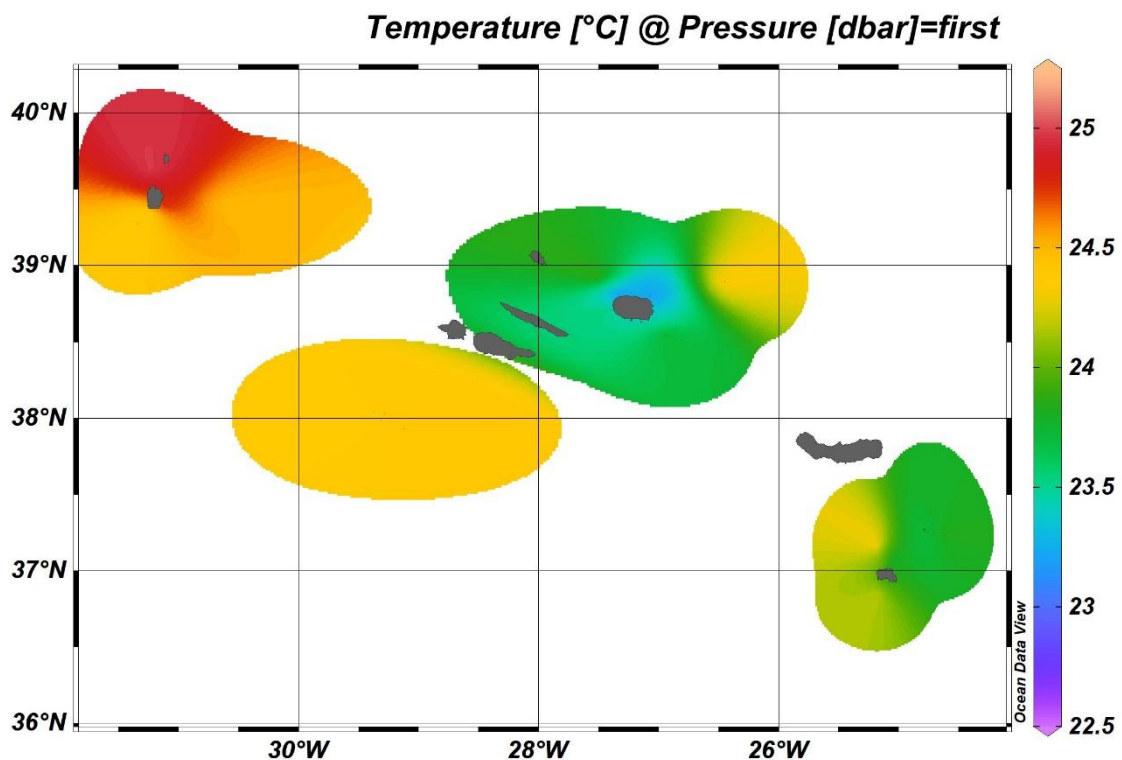
Silva *et al.* (2013) verificaram que o fitoplâncton nos Açores apresenta uma variação espacial significativa, com maior biomassa observada nas ilhas orientais, como Santa Maria, e evidências da influência local das ilhas na retenção de massas de água e no enriquecimento biogeoquímico. Esta variação é consistente com um gradiente longitudinal imposto pela circulação do Giro Subtropical, o qual determina diferenças de temperatura, salinidade e disponibilidade de nutrientes ao longo do arquipélago (Bashmachnikov *et al.*, 2004b; Klein & Siedler, 1989). De acordo com esta dinâmica, as águas que rodeiam a ilha das Flores e o Banco Princesa Alice são, geralmente, mais frias e menos salinas, refletindo a influência de massas subpolares e de uma maior mistura vertical. Tais condições favorecem o fornecimento de nutrientes e de oxigénio na camada superficial (C. S. Martins *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2013), mas também implicam instabilidade física e tempos de residência reduzidos, que podem limitar a acumulação de biomassa (McGillicuddy *et al.*, 2007). Em contrapartida, as regiões central e oriental, embora mais estratificadas e com concentrações de nutrientes dissolvidos mais baixas, apresentam condições propícias à retenção de células e à manutenção de comunidades fotossintéticas ativas, mesmo a profundidades como a DCM. Estes mecanismos foram também apontados por Brotas *et al.* (2013, 2022, 2023), e Gove *et al.* (2016), reforçando

a hipótese de um efeito insular e de enriquecimento regional, à semelhança do que se verifica noutros sistemas subtropicais (Arístegui *et al.*, 2009; Henson *et al.*, 2011; Marañón *et al.*, 2000). Barcelos e Ramos *et al.* (2017) destacam que, apesar da natureza normalmente pobre em nutrientes destas águas, pequenos pulsos de nutrientes — em particular de azoto — podem desencadear alterações rápidas na estrutura e produtividade do fitoplâncton.

Antes de prosseguir com mais comparações entre estudos, importa salientar que os de Narciso *et al.* (2022), Silva *et al.* (2013) e Arístegui *et al.* (2009) baseiam-se em dados obtidos na camada superficial ou na zona eufótica superior, refletindo padrões térmicos médios e persistentes na região dos Açores, geralmente, caracterizados por águas mais quentes nos setores central e oriental (Terceira, Santa Maria e Banco das Formigas) e águas mais frias no setor ocidental (Flores e região da Princesa Alice). Este gradiente longitudinal está associado à circulação do NAST e, em particular, à ação conjugada da CG e da CA, que condicionam a distribuição térmica e a estrutura da coluna de água até profundidades subsuperficiais.

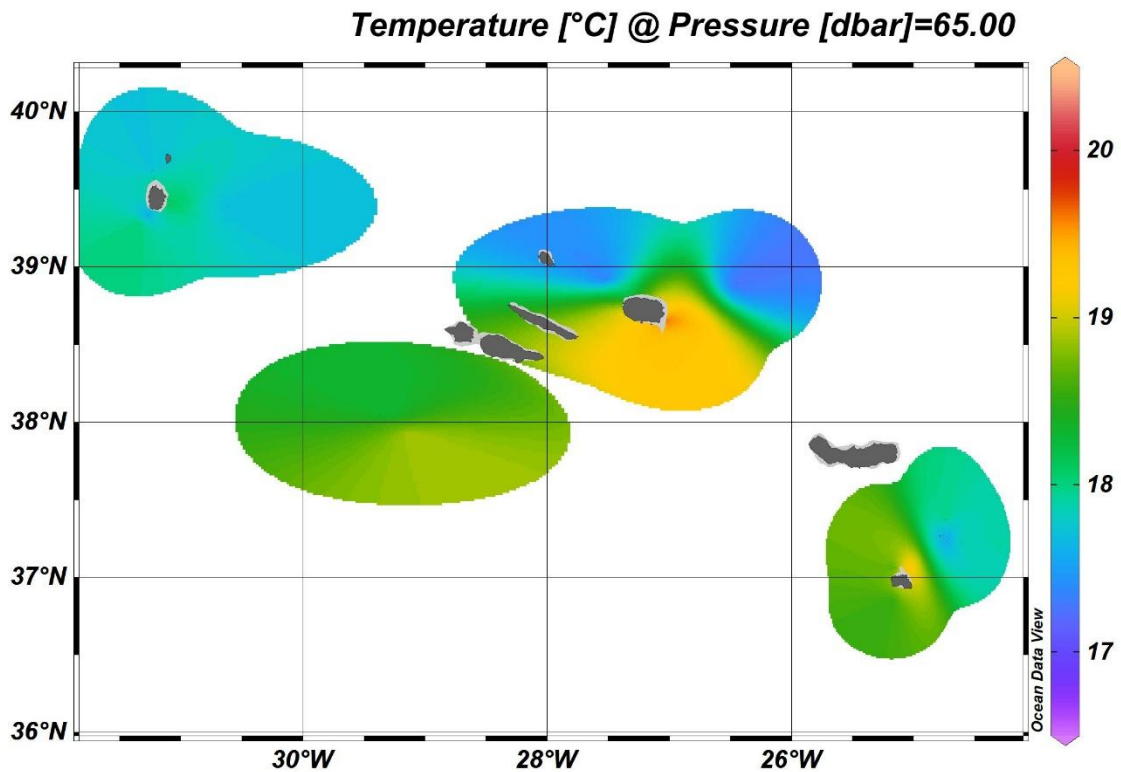
De acordo com Narciso *et al.* (dados não publicados) observou-se uma assimetria noroeste-sudeste na biomassa nanofitoplanctónica ao longo do arquipélago, refletindo a influência das massas de água dominantes. O transporte de águas com direção predominante de oeste para leste, associado à CG, afeta principalmente as ilhas do grupo ocidental e parte do grupo central. Por outro lado, a CA, ao interagir com a topografia submarina (Heinrichs *et al.*, 2024) no setor oriental, promove a formação de remoinhos e frentes que contribuem para o enriquecimento da camada superficial em nutrientes. Ainda que estas zonas orientais apresentem temperaturas mais elevadas e menor disponibilidade de nutrientes dissolvidos, os dados sugerem que a interação entre batimetria e dinâmica oceânica — incluindo circulação em mesoescala e retenção localizada — pode sustentar a produtividade primária. Este padrão, identificado por Narciso *et al.* (dados não publicados) e pelo presente estudo, é compatível com a hipótese de um efeito de enriquecimento local induzido por ilhas e montes submarinos (Arístegui *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2013). No entanto, os dados de temperatura superficial obtidos durante a campanha oceanográfica (27 de agosto a 3 de outubro de 2018) revelam um padrão térmico invertido à superfície: as águas superficiais encontravam-se mais quentes nas Flores e no

monte submarino Princesa Alice e mais frias nas regiões central e oriental (Terceira, Santa Maria e Formigas) (Figura IV-2), em contradição com o que é habitual. Esta anomalia térmica superficial poderá ter resultado da passagem da tempestade tropical Helene (*National Hurricane Center, 2018*), ocorrida nos dias 15 e 16 de setembro, que terá promovido intensa mistura vertical, advecção e arrefecimento superficial nas zonas central e oriental, alterando temporariamente a estratificação térmica típica da estação à superfície.



**Figura IV-2:** Distribuição horizontal da temperatura (°C) na camada superficial (pressão, ~5 dbar) ao longo do arquipélago dos Açores, durante a campanha oceanográfica. Os valores de temperatura foram interpolados espacialmente com base nos dados obtidos *in situ* e representam o padrão térmico regional à escala da província NAST. Observa-se um gradiente térmico evidente de noroeste para sudeste, com temperaturas mais elevadas (>25 °C) nas regiões ocidentais e valores mais baixos (~22.5 °C) no setor oriental. As ilhas estão representadas a cinzento.

Apesar desta perturbação atmosférica, os dados recolhidos à profundidade da DCM (~65 m) revelam um padrão térmico mais estável e consistente com a climatologia regional (Figura IV-3): as águas mantinham-se mais quentes nas regiões central e oriental (Terceira, Santa Maria e Formigas) e mais frias no setor ocidental (Flores e Princesa Alice).



**Figura IV-3:** Distribuição horizontal da temperatura (°C) a 65 metros de profundidade (65 dbar), aproximadamente, na região do arquipélago dos Açores, inserida na província oligotrófica do NAST. Os dados foram obtidos durante a campanha oceanográfica e interpolados espacialmente. Observa-se um gradiente térmico do noroeste para sudeste, com temperaturas mais elevadas (~20 °C) em áreas próximas à ilha da Terceira e valores mais baixos (<18 °C) nas regiões ocidentais. As ilhas estão representadas a cinzento.

A DCM situa-se, geralmente, dentro da termoclina, zona que se encontra relativamente protegida de perturbações atmosféricas de curta duração (Cullen *et al.*, 1982; Fennel & Boss, 2003). Assim, embora as camadas superficiais sejam suscetíveis a variações rápidas induzidas por eventos como tempestades tropicais, as características hidrológicas da DCM preservam-se mais facilmente, mantendo a influência dos padrões de circulação oceânica estabelecidos. Este contraste térmico subsuperficial reforça a interpretação de que a distribuição do microfitoplâncton é moldada não apenas pela concentração pontual de nutrientes, mas também pela estrutura física da coluna de água, incluindo processos de estratificação e profundidade da camada de mistura (Cullen *et al.*, 1982; Fennel & Boss, 2003), pela retenção localizada e pela circulação em mesoescala (Aristegui *et al.*, 2009; Basterretxea *et al.*, 2002), bem como pela fotoaclimação do fitoplâncton às condições de luz em profundidade (Falkowski & LaRoche, 1991).

A correspondência espacial entre os máximos de biomassa observados neste estudo e os registados para o nanofitoplâncton por Narciso *et al.* (2022)

nas mesmas regiões — Santa Maria e Banco das Formigas (em ambos os estudos) e na ilha da Terceira (no caso deste estudo) — sugere a atuação simultânea, embora diferenciada, de mecanismos ecológicos específicos a cada fração do fitoplâncton. Importa, no entanto, reconhecer que esta coincidência espacial entre os picos de nanofitoplâncton (como os coccolitóforos) e de microfitoplâncton não implica, necessariamente, uma resposta idêntica aos mesmos fatores ambientais. O nanofitoplâncton tende a prosperar em ambientes estratificados e oligotróficos, beneficiando da estabilidade da coluna de água e da sua elevada eficiência na captação de luz (Marañón, 2015; Winter & Siesser, 1994). Por sua vez, o microfitoplâncton depende, geralmente, de maior disponibilidade de nutrientes e de alguma turbulência, suficiente para manter as células em suspensão, mas não excessiva ao ponto de dispersar as populações (Reynolds, 2006; Smayda & Reynolds, 2001). A convergência de máximos de abundância em zonas como Santa Maria e Formigas pode, assim, resultar da atuação combinada, mas diferenciada, de processos ecológicos específicos a cada grupo funcional.

A análise integrada dos dados obtidos durante a campanha oceanográfica realizada no outono, no Arquipélago dos Açores, revelou variações espaciais marcantes nos parâmetros físicos, químicos e biológicos considerados. Com base nas médias regionais, destaca-se uma tendência de aumento da biomassa e da abundância de microfitoplâncton nas ilhas central e oriental (Terceira, Santa Maria e Formigas), em relação aos valores mais reduzidos nas regiões ocidentais (Flores e Princesa Alice).

Nas ilhas da Terceira e Santa Maria, registaram-se as temperaturas médias mais elevadas (18.99 °C e 18.75 °C, respetivamente), associadas a valores também mais elevados de biomassa de carbono (14.11  $\mu\text{g C L}^{-1}$  para a Terceira e 16.96  $\mu\text{g C L}^{-1}$  em Santa Maria) e de abundância celular. Estes resultados estão de acordo com o que tem sido reportado na literatura em relação ao efeito positivo da temperatura na taxa de crescimento do fitoplâncton (Bissinger *et al.*, 2008; Eppley, 1972; Geider *et al.*, 1997), sugerindo que o aumento da temperatura no intervalo térmico de 15 °C a 25 °C, para o oceano aberto, promove condições fisiológicas favoráveis ao crescimento do fitoplâncton em regiões oligotróficas.

No entanto, estudos em ambientes oligotróficos como os giros subtropicais sugerem que a disponibilidade de nutrientes pode, por vezes, limitar mais o crescimento do que a temperatura (Marañón *et al.*, 2014). Em regimes favoráveis, grupos como as diatomáceas e grandes dinoflagelados podem prosperar com luz abundante e pulsos de nutrientes (Brotas *et al.*, 2022). O microfitoplâncton é capaz de responder rapidamente a pulsos intermitentes de nutrientes, acumulando reservas e formando *blooms* sempre que possível (Cermeño *et al.*, 2006; Cloern, 1996). Como demonstrado por Marañón *et al.* (2021), a máxima biomassa observada em profundidade não foi sustentada por nutrientes novos, mas terá resultado da sedimentação de células, em conjugação com a elevada eficiência fotossintética de uma comunidade rica em diatomáceas e aclimatada a baixos níveis de luz, alimentada sobretudo por nutrientes regenerados.

A análise da PCA, baseada nas médias das variáveis ambientais por ilha ou monte submarino (Figura III-29) e dos *boxplots*, com a distribuição dos parâmetros físico-químicos e de nutrientes por ilha e monte submarino (*cf.* Figura III-2) mostra coerência nos padrões ambientais observados entre as ilhas e montes submarinos. A PCA sintetiza as relações entre variáveis e as ilhas/montes submarinos, enquanto os *boxplots* detalham a variação individual por ilha. Ambas indicam que Santa Maria está associada a águas mais quentes, Terceira a maiores concentrações de nutrientes e Flores a maior profundidade da camada de mistura e níveis de oxigénio. Os modelos de regressão linear simples reforçaram estes padrões (Figura III-30). A salinidade aumentou bastante de oeste para leste ( $p = 0.035$ ), sugerindo maior influência de águas atlânticas centrais nas ilhas orientais (Silva *et al.*, 2013). Apesar dos nutrientes não apresentarem tendência significativa com a posição geográfica, tanto a biomassa como a abundância aumentaram de forma significativa ao longo do gradiente longitudinal ( $p < 0.001$ ), indicando condições mais favoráveis à produtividade no setor oriental. Embora a disponibilidade de nutrientes em regiões oligotróficas seja geralmente baixa, a presença de montes submarinos e a batimetria irregular em zonas como o Banco das Formigas pode favorecer a retenção de biomassa ou mesmo o *upwelling* localizado. Por outro lado, a ilha das Flores apresentou a menor temperatura média (17.69 °C) e o segundo maior valor médio de oxigénio dissolvido (240.86  $\mu\text{mol/kg}$ ), depois do Banco das

Formigas (241.11  $\mu\text{mol/kg}$ ), mas, simultaneamente, os valores mais baixos de biomassa e abundância. Estes valores elevados de oxigénio dissolvido podem dever-se à maior solubilidade em águas frias ou à mistura superficial, e não tanto à produtividade primária. Estudos termodinâmicos mostram que a solubilidade do oxigénio diminui com o aumento da temperatura (Bok *et al.*, 2023; Walczyńska & Sobczyk, 2017). Em ambientes frios e oligotróficos, o oxigénio pode permanecer elevado devido à solubilidade térmica, mas não necessariamente refletir alta produtividade biológica (Di Biagio *et al.*, 2022). Por fim, uma outra explicação para este facto é a possibilidade de existir elevada proporção de picofitoplâncton, grupo que contribui consideravelmente para as concentrações de oxigénio dissolvido e para a clorofila *a* (Liu *et al.*, 2024), embora a sua biomassa seja frequentemente subestimada em análises baseadas apenas na fração total de clorofila. Os valores de oxigénio dissolvido obtidos nas amostras, situados entre 226.16  $\mu\text{mol/kg}$  e 252.23  $\mu\text{mol/kg}$ , indicam águas ventiladas e bem oxigenadas.

A comparação com estudos anteriores reforça os padrões observados. Brotas *et al.* (2013, 2022, 2023) identificaram padrões semelhantes de enriquecimento local de biomassa em zonas orientais e em torno de montes submarinos. De Queiroz *et al.* (2015), Head *et al.* (2002) e Silva *et al.* (2009, 2013) documentaram valores mais baixos de produtividade na região ocidental, nomeadamente, em torno da ilha das Flores, dados que estão em consonância com os valores médios encontrados no presente trabalho. A topografia complexa da região do arquipélago dos Açores pode originar fenómenos oceanográficos importantes como jatos e/ou correntes de retenção em torno dos montes submarinos (De Falco *et al.*, 2022; Mendonça *et al.*, 2012; Morato *et al.*, 2010; 2013).

Segundo Caldeira & Reis (2017), os padrões de distribuição da clorofila *a* nos Açores estão associados à circulação marinha regional. De forma semelhante, estudos sobre a distribuição da temperatura superficial do mar na região, baseados em dados de satélite e *in situ*, evidenciam que a variabilidade da circulação no sistema da Frente dos Açores condiciona a dinâmica oceânica e, por conseguinte, a variabilidade espacial da biomassa fitoplanctónica (Lafon *et al.*, 2004).

A presença de montes submarinos com características morfológicas distintas, como o Banco das Formigas e o Banco Princesa Alice, parece influenciar os padrões observados de biomassa e produtividade (Morato *et al.*, 2013). Ainda de acordo com estes autores, a fisiografia dos montes submarinos no Atlântico Nordeste exerce um papel determinante na modulação da biodiversidade e da produtividade local. A interação entre as correntes e a topografia do fundo oceânico pode promover retenção de partículas, *upwelling* localizado ou formação de estruturas de mesoescala, que favorecem o crescimento do fitoplâncton. Este efeito poderá justificar os maiores valores de abundância e de biomassa de carbono registados no Banco das Formigas, em contraste com os valores mais reduzidos dessas mesmas variáveis biológicas no Banco Princesa Alice, onde o cume do monte não se eleva tanto na coluna de água.

Fenómenos como remoinhos, meandros e filamentos desempenham um papel relevante no transporte, dispersão e retenção de partículas, como os nutrientes, nos Açores. De acordo com Sala *et al.* (2016), a capacidade de retenção das ilhas está relacionada com a dimensão de cada grupo insular. O grupo ocidental apresenta a menor capacidade de captura e o menor tempo médio de retenção a todas as profundidades, enquanto os grupos central e oriental apresentam capacidades semelhantes. Estas diferenças de capacidade de retenção contribuem para as variações regionais de produtividade. A distinta capacidade das ilhas em capturar e reter partículas, descrita por Wolanski (1994) como *Sticky Water Effect*, pode também justificar a assimetria observada no arquipélago, com maiores abundâncias e biomassa a sudeste.

Os resultados obtidos nesta investigação permitem rejeitar a hipótese nula segundo a qual *não há influência detetável das ilhas na abundância, composição e distribuição da comunidade fitoplanctónica, especialmente, não há upwelling, o que poderia aumentar o crescimento do microfitoplâncton*. De facto, também a análise da riqueza específica revelou diferenças estatisticamente significativas entre regiões, com valores mais elevados nas ilhas da Terceira, Santa Maria e Banco das Formigas, reforçando a ideia de que fatores locais associados à presença das ilhas influenciam a estrutura e produtividade da comunidade microfitoplanctónica.

A distribuição da biomassa e da abundância observada pode ser explicada pela interação entre temperatura, disponibilidade de nutrientes, estrutura da coluna de água e topografia submarina (De Queiroz *et al.*, 2015). Estes elementos atuam em conjunto para criar condições físicas favoráveis à retenção e acumulação de células fitoplanctónicas, contrariando a ideia de homogeneidade espacial típica de ambientes oceânicos oligotróficos. Os Açores apresentam um ambiente mesotrófico, por oposição aos montes submarinos oligotróficos e à costa portuguesa eutrófica (Brotas *et al.*, 2013). Neste contexto, os mecanismos físicos descritos por Sala *et al.* (2016), nomeadamente, a formação de remoinhos de mesoescala e zonas de *upwelling* localizada associadas à batimetria, assumem uma particular relevância para a região dos Açores.

A presença de estruturas topográficas como ilhas e montes submarinos poderá, assim, promover zonas de retenção e enriquecimento local, facilitando a acumulação de biomassa microfitoplanctónica. Este cenário é compatível com os padrões espaciais identificados, reforçando a ideia de que a variabilidade regional observada resulta não apenas de variáveis ambientais clássicas, mas também da ação moduladora de processos físicos locais, discordante com a hipótese nula inicialmente formulada (Caldeira & Reis, 2017; Leitner *et al.*, 2020; Sala *et al.*, 2016).

#### IV.4. Estrutura e biomassa de carbono das comunidades microfitoplanctónicas e parâmetros físico-químicos por distância à costa

Com o objetivo de analisar a composição e distribuição das comunidades microfitoplanctónicas e a biomassa de carbono de acordo com a proximidade das amostras à costa ou zona de referência, estabeleceram-se duas categorias de distância segundo a mediana de 6.8 km (*cf.* Figura II-4). A categoria “Próximo” incluiu 16 amostras correspondentes a distâncias inferiores ou iguais a 6.8 km da costa ou do ponto de referência e “Afastado”, com 15 amostras, localizadas a distâncias superiores a 6.8 km.

Os resultados obtidos indicam que as estações classificadas como “Próximo” apresentaram valores médios mais elevados de abundância e biomassa de carbono de microfitoplâncton, sobretudo em diatomáceas (*cf.* Figuras III-20, III-21, III-22 e III-23). Este padrão é compatível com o efeito de massa insular (IME), um fenómeno descrito em zonas oceânicas oligotróficas, segundo o qual a interação entre a topografia submarina, a hidrodinâmica local e a retenção de partículas orgânicas favorece o enriquecimento biológico nas proximidades de ilhas e montes submarinos (Doty & Oguri, 1956; Gove *et al.*, 2016; Morato *et al.*, 2008; Morato *et al.*, 2010, 2013; Sala *et al.*, 2016).

Os resultados descritivos revelam uma tendência para valores médios mais elevados de biomassa e abundância celular nas estações mais próximas da costa. Esta tendência é evidente no caso das diatomáceas, que apresentaram abundâncias e biomassa mais elevadas nas zonas costeiras, dominando a comunidade microfitoplanctónica em ambas as categorias (*cf.* Figuras III-21 e III-23). Este padrão é, particularmente, relevante para a interpretação dos dados obtidos nos Açores, uma vez que, apesar de se tratar de uma região oligotrófica do NAST, foram observados pulsos localizados de biomassa, frequentemente associados à presença de diatomáceas em profundidade (por exemplo, na camada da DCM) ou em zonas próximas de ilhas e montes submarinos. Tal como descrito por Tucker *et al.* (2025) a presença de grupos com maior exigência em nutrientes, como as diatomáceas, pode ser explicada pela existência de fontes locais de nutrientes, designadamente, as geradas pela interação entre a topografia submarina e a circulação regional. No entanto, os testes aplicados não permitiram rejeitar a hipótese nula, ou seja, não se verificou uma diferença estatisticamente significativa na abundância nem na composição da comunidade fitoplanctónica entre estações próximas e afastadas da costa (Wilcoxon,  $p = 0.861$ ). Esta conclusão foi corroborada pela análise PERMANOVA ( $p = 0.438$ ), que indicou que a distância à costa explica apenas uma pequena fração da variação na composição taxonómica ( $R^2 = 0.026$ ). A composição taxonómica por ordens mantém-se relativamente constante, com variações mais subtis ao nível da abundância e da biomassa do que na composição taxonómica propriamente dita (*cf.* Figura III-24). Esta estabilidade da composição, mesmo com alterações na biomassa, também tem sido observada em ecossistemas oligotróficos do NAST (Brotas *et al.*, 2022; Marañón *et al.*, 2000; van de Poll *et al.*, 2013). Importa

salientar que, embora classificadas como “Afastado”, estas estações mantêm-se relativamente próximas da costa, com apenas duas a ultrapassar os 45 km de distância. Assim, é plausível que o sinal costeiro (*upwelling* localizado, circulação retentiva ou *inputs* bentónicos) ainda exerça alguma influência nestas áreas, como defendido por estudos em arquipélagos subtropicais (Arístegui *et al.*, 2009; Bashmachnikov *et al.*, 2009; De Falco *et al.*, 2022).

A análise dos índices ecológicos (*Shannon*, riqueza e equidade) não revelou diferenças significativas entre categorias de distância para todos os índices, reforçando a não rejeição da hipótese nula e sugerindo uma composição e diversidade semelhantes entre zonas costeiras e oceânicas (*cf.* Tabela III-8, Figura III-25). Ainda que o grupo “Próximo” apresentasse valores médios ligeiramente superiores para os índices de *Shannon* e de riqueza, essas variações não alcançaram significância estatística.

Os modelos de regressão linear simples ajustados às variáveis ambientais e biológicas revelaram coeficientes de determinação relativamente baixos para a maioria das relações analisadas, indicando uma capacidade explicativa limitada da distância à costa (Figura III-33). Apenas a temperatura ( $R^2 = 0.237$ ;  $p = 0.00546$ ) e o oxigénio dissolvido ( $R^2 = 0.159$ ;  $p = 0.0262$ ) apresentaram relações estatisticamente significativas, evidenciando uma tendência decrescente da temperatura e um aumento do oxigénio dissolvido com o afastamento da costa. As restantes variáveis, incluindo biomassa e abundância de microfitoplâncton transformadas, não apresentaram correlação significativa com a distância à costa (*cf.* Tabela F-II, Anexo F). Esta ausência de associação sugere que, em regiões oligotróficas como o Arquipélago dos Açores, a distribuição e a biomassa do microfitoplâncton são influenciadas por fatores locais e regionais complexos, tais como circulação hidrodinâmica, retenção em montes submarinos, disponibilidade de nutrientes em mesoescala e estratificação da coluna de água, mais do que pelo gradiente linear de distância à costa. Deste modo, embora a distância à costa apresente um efeito estatisticamente significativo sobre algumas variáveis físico-químicas, o seu impacto direto sobre a biomassa e abundância do microfitoplâncton é limitado, refletindo a predominância de processos biológicos e hidrodinâmicos na regulação destas comunidades em ambientes oligotróficos.

A análise multivariada por PCA aplicada às variáveis físico-químicas revelou padrões relevantes (Figura III-32). A PCA mostrou uma separação parcial entre as categorias espaciais "Próximo" e "Afastado", mais evidente ao longo da Dimensão 1 (28.7% da variância explicada). Esta componente apresentou cargas elevadas e negativas para a MLD, o oxigênio dissolvido, a velocidade do vento e fosfato, sugerindo um gradiente ambiental entre águas mais turbulentas e bem oxigenadas e águas mais estratificadas. Já a Dimensão 2 (20.1%) refletiu, principalmente, a variação em nutrientes, como nitrato + nitrito e silicato, associados a águas mais frias e ricas em nutrientes, compatíveis com o perfil das estações oceânicas (Tabela III-10).

A comparação direta entre grupos confirmou que as estações "Afastado" se caracterizam por temperaturas ligeiramente inferiores, concentrações mais elevadas de nutrientes, maior velocidade do vento e MLD mais profundo (Tabela III-11). Estas condições refletem ambientes mais dinâmicos e expostos, com menor estabilidade da coluna de água e processos de mistura vertical, que podem reduzir o tempo de permanência e a retenção de biomassa fitoplanctônica. As zonas costeiras apresentaram, em média, maior biomassa e abundância, um aparente paradoxo face à menor concentração de nutrientes. Este padrão torna-se, particularmente, evidente no caso dos silicatos (de origem terrestre), que apresentam os valores mais baixos nas áreas costeiras, onde ocorre maior abundância de diatomáceas, podendo esta situação dever-se ao consumo deste nutriente por este grupo de microfitoplâncton. Estes resultados são compatíveis com estudos anteriores realizados na região dos Açores (Brotas et al., 2022, 2023; Silva et al., 2013), que identificaram o papel dos mecanismos locais de retenção, subsidência e mistura induzida pela topografia na manutenção da produtividade, mesmo em condições oligotróficas. Os resultados apresentados são coerentes com o efeito de massa de ilha, previamente descrito, e reforçam a complexidade e a natureza multivariada do sistema, onde nenhuma variável ambiental ou biológica, considerada isoladamente, se correlaciona de forma robusta com a distância à costa. Em resumo, os resultados obtidos não permitem rejeitar a hipótese nula que postula não haver *diferença entre a abundância e a composição da comunidade fitoplanctônica perto da costa e longe da costa*. Os padrões descritivos e os gradientes ambientais revelados pela PCA sugerem que a estrutura da comunidade pode ser influenciada por mecanismos indiretos relacionados

com a topografia insular e a dinâmica físico-química local. Acresce a tudo o que já foi sublinhado a constatação de que as condições oceanográficas no período amostrado terem sido afetadas pela tempestade pós-tropical Helene (acima já mencionada). Este evento, bem como a ocorrência de outras tempestades tropicais que alteraram o clima da região durante a campanha oceanográfica (George *et al.*, 2018), pode ter introduzido variabilidade adicional nos padrões observados, nomeadamente, nas estações “Afastado”, mais expostas à ação direta do vento e das correntes associadas à tempestade. Este fenómeno poderá ter contribuído para a homogeneização de certas variáveis físico-químicas, redistribuído nutrientes e partículas ao longo do gradiente costeiro-oceânico e para o aumento da variabilidade intra-grupo, como evidenciado nas análises descritivas e na dispersão dos valores nas regressões. Tais eventos são reconhecidos como desencadeadores de alterações abruptas na produtividade e estrutura das comunidades planctónicas (Marañón *et al.*, 2003; Savidge *et al.*, 1995; Waniek, 2003; Woods & Barkmann, 1995), podendo explicar parte da variabilidade observada, sobretudo nas estações com maior biomassa em zonas próximas.

A integração de abordagens estatísticas multivariadas e o conhecimento ecológico regional é, portanto, essencial para interpretar de forma adequada os processos que regulam a produtividade fitoplanctónica no NAST.

Os resultados aqui discutidos corroboram a hipótese de uma influência moderada, mas detetável, da proximidade às ilhas e montes submarinos na estrutura e biomassa das comunidades microfitoplanctónicas, mesmo em escalas espaciais reduzidas. Esta influência manifesta-se, principalmente, nas variáveis de abundância, biomassa e oxigénio dissolvido, enquanto a composição taxonómica permanece estável. A combinação de fatores físicos, como o vento, MLD e nutrientes, e fatores externos como a tempestade Helene, contribuiu para moldar os padrões observados, reforçando a complexidade ambiental da região dos Açores e a necessidade de abordagens integradas e multivariadas aquando do seu estudo.

## V. Conclusões

Esta dissertação foi estruturada em função das hipóteses nulas formuladas e seguiu três eixos principais: análise da estrutura e composição das comunidades microfitoplanctónicas; verificação das hipóteses nulas formuladas; e, por fim, caracterização dos parâmetros físico-químicos em função da localização geográfica das ilhas e montes submarinos e da distância à costa ou ponto de referência.

Os resultados obtidos evidenciaram uma elevada variabilidade espacial na abundância, biomassa e composição taxonómica do microfitoplâncton na região do Arquipélago dos Açores. Estes padrões são compatíveis com a influência da topografia submarina, da dinâmica oceanográfica regional e de fatores físico-químicos locais, refletindo a complexidade ambiental da província oligotrófica do Giro Subtropical do Atlântico Norte Oriental (NAST).

As análises estatísticas permitiram rejeitar a hipótese nula de ausência de influência das ilhas e montes submarinos na estrutura da comunidade microfitoplanctónica. Verificaram-se diferenças, estatisticamente significativas entre regiões, em particular para as zonas central e oriental, designadamente, para as ilhas da Terceira e de Santa Maria e para o Banco das Formigas, que apresentaram maior biomassa, abundância e diversidade, evidenciando a existência de um padrão espacial de aumento da biomassa ao longo de um gradiente oeste-leste. Estes resultados confirmam a importância dos mecanismos físicos associados à presença das ilhas e montes submarinos, como retenção localizada, subsidência e possíveis fenómenos de *upwelling*. As ilhas da Terceira, Santa Maria e o Banco das Formigas, encontram-se na região interior do NAST (geralmente, a sul da Frente dos Açores) onde predominam águas quentes, estratificadas e pobres em nutrientes à superfície, mas com formação consistente de DCM. Nestes locais, a combinação entre temperaturas moderadas, retenção local e estruturas de mesoescala pode sustentar biomassa significativa, mesmo em condições oligotróficas. Pelo contrário, as Flores e o Banco Princesa Alice, localizadas mais a ocidente e próximas ou a norte da frente, encontram-se sob influência de águas subpolares mais frias e ricas em nutrientes. No entanto, a menor estabilidade da coluna de água, agravada por

eventos como a passagem da tempestade Helene, poderá ter inibido a acumulação de biomassa nestas zonas.

Apesar da influência da distância à costa não ter sido estatisticamente significativa, observou-se uma tendência para maiores valores de biomassa e abundância nas estações mais próximas das ilhas e montes submarinos, sugerindo um possível efeito de enriquecimento insular. A dominância das diatomáceas, especialmente, em regiões com maior retenção e/ou disponibilidade pontual de nutrientes, reforça a ideia de que estes organismos respondem de forma positiva a condições mais favoráveis, enquanto os dinoflagelados apresentaram distribuição mais homogénea, indicando maior tolerância a condições estáveis e pobres em nutrientes.

A biomassa de carbono produzida pelo microfitoplâncton na DCM, observada neste estudo, enquadra-se nos valores característicos de outros estudos envolvendo diferentes grupos de fitoplâncton na província biogeoquímica NAST, o que reforça a consistência dos resultados obtidos. Estes dados, quando relacionados com os parâmetros ambientais e oceanográficos analisados, confirmam que a estrutura da coluna de água, a circulação regional, a batimetria e a profundidade da DCM são fatores-chave na modulação da produtividade fitoplanctónica nos Açores. A ocorrência de eventos episódicos de elevada produtividade pode exercer impacto relevante sobre o balanço metabólico regional do oceano.

Este trabalho evidencia a escassez de estudos centrados nas comunidades microfitoplanctónicas associadas às ilhas e montes submarinos, sobretudo na DCM e no Arquipélago dos Açores. Apesar da sua relevância ecológica e biogeoquímica, especialmente, em regiões oligotróficas como os Açores, a sua caracterização permanece limitada. A presença de montes submarinos poderá potenciar *hotspots* de produtividade local, sendo, por isso, essencial investir em abordagens multidisciplinares e escalas temporais alargadas, no sentido de uma maior compreensão dos processos que sustentam a produtividade primária marinha. Assim, esta dissertação constitui um contributo relevante para o aprofundamento do conhecimento sobre a composição e distribuição do microfitoplâncton em regiões insulares do oceano Atlântico Nordeste e na compreensão da sua relação com os fenómenos oceanográficos e características físico-químicas da região. Destaca-se a importância de continuar

a investigação sobre a caracterização ecológica, taxonómica e funcional destas comunidades e o seu papel na dinâmica biogeoquímica, nomeadamente, em áreas de elevado interesse ecológico como o Banco das Formigas, atualmente sob proteção legal, a nível regional, europeu e internacional.

Neste contexto, os dados obtidos e os padrões identificados neste estudo constituem uma referência importante para o reforço da monitorização do microfitoplâncton no âmbito da Diretiva-Quadro Estratégia Marinha (DQEM), sobretudo, em regiões insulares oligotróficas como o Arquipélago dos Açores, onde também os efeitos das alterações climáticas sobre os oceanos e os processos físicos de mesoescala se fazem sentir. Estes resultados sublinham a relevância ecológica das comunidades microfitoplanctónicas como bioindicadores da qualidade ambiental e da produtividade primária. Constituem, igualmente, uma base sólida para orientar futuras campanhas de monitorização e definir estratégias de gestão marinha sustentável em arquipélagos oceânicos oligotróficos.

## VI. Referências

- Adl, S. M., Bass, D., Lane, C. E., Lukeš, J., Schoch, C. L., Smirnov, A., Agatha, S., Berney, C., Brown, M. W., Burki, F., Cárdenas, P., Čepička, I., Chistyakova, L., Del Campo, J., Dunthorn, M., Edvardsen, B., Eglit, Y., Guillou, L., Hampl, V., ... Zhang, Q. (2019). Revisions to the classification, nomenclature, and diversity of eukaryotes. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 66(1), 4–119. <https://doi.org/10.1111/jeu.12691>
- Agustí, S., & Duarte, C. M. (1999). Phytoplankton chlorophyll a distribution and water column stability in the central Atlantic Ocean. *Oceanologica Acta*, 22(2), 193–203. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(99\)80045-0](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(99)80045-0)
- Allen, J. T., Brown, L., Sanders, R., Mark Moore, C., Mustard, A., Fielding, S., Lucas, M., Rixen, M., Savidge, G., Henson, S., & Mayor, D. (2005). Diatom carbon export enhanced by silicate upwelling in the northeast Atlantic. *Nature*, 437(7059), 728–732. <https://doi.org/10.1038/nature03948>
- Allison, P. (2002). *Missing data*. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412985079>
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26(1), 32–46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>
- Anderson, M. J. (2006). Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics*, 62(1), 245–253. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2005.00440.x>
- Arístegui, J., Mendonça, A., Vilas, J. C., Espino, M., Polo, I., Montero, M. F., & Martins, A. (2009). Plankton metabolic balance at two North Atlantic seamounts. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(25), 2646–2655. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.025>
- Armbrust, E. V. (2009). The life of diatoms in the world's oceans. *Nature*, 459(7244), 185–192. <https://doi.org/10.1038/nature08057>
- Attaran-Fariman, E., & Bolch, C. J. (2012). Morphology and phylogeny of *Scrippsiella trochoidea* (Dinophyceae) from the Persian Gulf and Gulf of Oman, Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 11(2), 252–270.
- Azevedo, J. M. M., & Portugal Ferreira, M. R. (2006). The volcanotectonic evolution of Flores Island, Azores (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156(1), 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.011>
- Barcelos e Ramos, J., Schulz, K. G., Voss, M., Narciso, Á., Müller, M. N., Reis, F. V., Cachão, M., & Azevedo, E. B. (2017). Nutrient-specific responses of a phytoplankton community: A case study of the North Atlantic Gyre, Azores. *Journal of Plankton Research*, 39(4), 744–761. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbx025>

- Bashmachnikov, I., Machín, F., & Mendonça, A. (2004a). In-situ and remote sensing signature of meddies in the NE Atlantic. *Oceanologica Acta*, 27(2), 145–159.
- Bashmachnikov, I., Lafon, V., & Martins, A. (2004b). Sea surface temperature distribution in the Azores region. Part II: Space-time variability and underlying mechanisms. *Arquipélago. Life and Marine Sciences*, 21A, 19–32.
- Bashmachnikov, I., Mohn, C., Pelegrí, J. L., Martins, A., Jose, F., Machín, F., & White, M. (2009). Interaction of Mediterranean water eddies with Sedlo and Seine Seamounts, Subtropical Northeast Atlantic. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(25), 2593–2605. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.036>
- Basterretxea, G., Barton, E., Tett, P., Montero, M., & Arístegui, J. (2002). Eddies around islands: Ecological consequences. *Oceanography*, 15(2), 70–81.
- Behrenfeld, M. J. (2010). Abandoning Sverdrup's critical depth hypothesis on phytoplankton blooms. *Ecology*, 91(4), 977–989. <https://doi.org/10.1890/09-1207.1>
- Behrenfeld, M. J., & Boss, E. (2003). The beam attenuation to chlorophyll ratio: An optical index of phytoplankton physiology in the surface ocean? *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50(12), 1537–1549. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.09.002>
- Behrenfeld, M. J., & Boss, E. S. (2018). Student's tutorial on bloom hypotheses in the context of phytoplankton annual cycles. *Global Change Biology*, 24(1), 55–77. <https://doi.org/10.1111/gcb.13858>
- Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A., & Shea, D. M. (2005). Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1), GB2004. <https://doi.org/10.1029/2004GB002299>
- Behrenfeld, M. J., & Boss, E. S. (2014). *Resurrecting the ecological underpinnings of ocean plankton blooms. Annual Review of Marine Science*, 6, 167–194. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-052913-021325>
- Bissinger, J. E., Montagnes, D. J. S., Harples, J., & Atkinson, D. (2008). Predicting marine phytoplankton maximum growth rates from temperature: Improving on the Eppley curve using quantile regression. *Limnology and Oceanography*, 53(2), 487–493. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.2.0487>
- Björn, L. O., Papageorgiou, G. C., Blankenship, R. E., & Govindjee. (2009). A viewpoint: Why chlorophyll a? *Photosynthesis Research*, 99(2), 85–98. <https://doi.org/10.1007/s11120-008-9395-x>
- Blanco, S. (2020). Diatom taxonomy and identification keys. In G. Cristóbal, S. Blanco, & G. Bueno (Eds.), *Modern trends in diatom identification* (pp. 25–38). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39212-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39212-3_3)

- Boehlert, G. W., & Genin, A. (1987). *A review of the effects of seamounts on biological processes* (NOAA Technical Report NMFS 43). U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.
- Boehlert, G. W. (1988). Current-topography interactions at mid-ocean seamounts and the impact on pelagic ecosystems. *GeoJournal*, 16(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/BF02626371>
- Bok, F., Moog, H. C., & Brendler, V. (2023). The solubility of oxygen in water and saline solutions. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 2, 1158109. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1158109>
- Bollmann, J., Cortés, M. Y., Haidar, A. T., Brabec, B., Close, A., Hofmann, R., Palma, S., Tupas, L., & Thierstein, H. R. (2002). Techniques for quantitative analyses of calcareous marine phytoplankton. *Marine Micropaleontology*, 44(3–4), 163–185. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(01\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(01)00040-8)
- Botelho, J. V. (2014). *Caracterização e distribuição espacial da comunidade fitoplanctónica do banco submarino Condor (SE do Faial, Açores): Relação com os parâmetros oceanográficos adjacentes* [Dissertação de Mestrado]. Universidade dos Açores.
- Bower, A. S., & von Appen, W.-J. (2008). Interannual variability in the pathways of the North Atlantic current over the Mid-Atlantic Ridge and the impact of topography. *Journal of Physical Oceanography*, 38(1), 104–120. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3686.1>
- Bristow, L. A., Mohr, W., Ahmerkamp, S., & Kuypers, M. M. M. (2017). Nutrients that limit growth in the ocean. *Current Biology*, 27(11), R474–R478. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.030>
- Brotas, V., Brewin, R. J. W., Sá, C., Brito, A. C., Silva, A., Mendes, C. R., Diniz, T., Kaufmann, M., Tarran, G., Groom, S. B., Platt, T., & Sathyendranath, S. (2013). Deriving phytoplankton size classes from satellite data: Validation along a trophic gradient in the eastern Atlantic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 134, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.013>
- Brotas, V., Ferreira, A., Veloso, V., Tracana, A., Guerreiro, C. V., Tarran, G. A., Woodward, E. M. S., Ribeiro, L., Netting, J., Clewley, D., & Groom, S. B. (2023). Assessing phytoplankton community composition in the Atlantic Ocean from in situ and satellite observations. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1229692. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1229692>
- Brotas, V., Tarran, G. A., Veloso, V., Brewin, R. J. W., Woodward, E. M. S., Airs, R., Beltran, C., Ferreira, A., & Groom, S. B. (2022). Complementary approaches to assess phytoplankton groups and size classes on a long transect in the Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 8, 682621. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.682621>
- Buitenhuis, E. T., Hashioka, T., & Le Quéré, C. (2013). Combined constraints on global ocean primary production using observations and models. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(3), 847–858. <https://doi.org/10.1002/gbc.20074>

- Caldeira, R. M. A., & Reis, J. C. (2017). The Azores confluence zone. *Frontiers in Marine Science*, 4, 37. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00037>
- Carstensen, J. (2007). Statistical principles for ecological status classification of Water Framework Directive monitoring data. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.016>
- Castellani, C., & Edwards, M. (Eds.). (2017). *Marine plankton: A practical guide to ecology, methodology, and taxonomy* (1st ed.). Oxford University Press.
- Cermeño, P., Dutkiewicz, S., Harris, R. P., Follows, M., Schofield, O., & Falkowski, P. G. (2008). The role of nutricline depth in regulating the ocean carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(51), 20344–20349. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811302106>
- Cermeño, P., Marañón, E., Pérez, V., Serret, P., Fernández, E., & Castro, C. G. (2006). Phytoplankton size structure and primary production in a highly dynamic coastal ecosystem (Ría de Vigo, NW-Spain): Seasonal and short-time scale variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2), 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.027>
- Chitari, R. R., & Anil, A. C. (2017). Estimation of diatom and dinoflagellate cell volumes from surface waters of the Northern Indian Ocean. *Oceanologia*, 59(3), 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.03.001>
- Cloern, J. E. (1996). Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Reviews of Geophysics*, 34(2), 127–168. <https://doi.org/10.1029/96RG00986>
- Cloern, J. E., Grenz, C., & Vidregar-Lucas, L. (1995). An empirical model of the phytoplankton chlorophyll:Carbon ratio—the conversion factor between productivity and growth rate. *Limnology and Oceanography*, 40(7), 1313–1321. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.7.1313>
- Comissão Europeia. (2017). Decisão (UE) 2017/848 da Comissão, de 17 de maio de 2017, que estabelece critérios e normas metodológicas relativos ao bom estado ambiental das águas marinhas e especificações e métodos normalizados de monitorização e avaliação, e que revoga a Decisão 2010/477/UE. *Jornal Oficial da União Europeia*, L125, 43–74. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32017D0848>
- Cornet-Barthaux, V., Armand, L., & Quéguiner, B. (2007). Biovolume and biomass estimates of key diatoms in the Southern Ocean. *Aquatic Microbial Ecology*, 48, 295–308. <https://doi.org/10.3354/ame048295>
- Cullen, J. J., Reid, F. M. H., & Stewart, E. (1982). Phytoplankton in the surface and chlorophyll maximum off southern California in August, 1978. *Journal of Plankton Research*, 4(3), 665–694. <https://doi.org/10.1093/plankt/4.3.665>

- Dancey, C. P., & Reidy, J. (2007). *Statistics without maths for psychology: Using SPSS for Windows* (4th ed.). Pearson Education.
- Daugbjerg, N., Hansen, G., Larsen, J., & Moestrup, Ø. (2000). Phylogeny of some of the major genera of dinoflagellates based on ultrastructure and partial LSU rDNA sequence data, including the erection of three new genera of unarmoured dinoflagellates. *Phycologia*, 39(4), 302–317. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-39-4-302.1>
- Davies, C. H., Coughlan, A., Hallegraeff, G., Ajani, P., Armbrecht, L., Atkins, N., Bonham, P., Brett, S., Brinkman, R., Burford, M., Clementson, L., Coad, P., Coman, F., Davies, D., Dela-Cruz, J., Devlin, M., Edgar, S., Eriksen, R., Furnas, M., ... Richardson, A. J. (2016). A database of marine phytoplankton abundance, biomass and species composition in Australian waters. *Scientific Data*, 3(1), 160043. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.43>
- De Falco, C., Desbiolles, F., Bracco, A., & Pasquero, C. (2022). Island Mass Effect: A review of oceanic physical processes. *Frontiers in Marine Science*, 9, 894860. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.894860>
- De Queiroz, A. R., Flores Montes, M., de Castro Melo, P. A. M., da Silva, R. A., & Koenig, M. L. (2015). Vertical and horizontal distribution of phytoplankton around an oceanic archipelago of the Equatorial Atlantic. *Marine Biodiversity Records*, 8, e155. <https://doi.org/10.1017/S175526721500130X>
- Delwiche, C. F. (2007). Chapter 10—The origin and evolution of dinoflagellates. In P. G. Falkowski & A. H. Knoll (Eds.), *Evolution of primary producers in the sea* (pp. 191–205). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012370518-1/50011-4>
- Devlin, M., Bricker, S., & Painting, S. (2011). Comparison of five methods for assessing impacts of nutrient enrichment using estuarine case studies. *Biogeochemistry*, 106(2), 177–205. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9588-9>
- Di Biagio, V., Salon, S., Feudale, L., & Cossarini, G. (2022). Subsurface oxygen maximum in oligotrophic marine ecosystems: Mapping the interaction between physical and biogeochemical processes. *Biogeosciences*, 19(23), 5553–5574. <https://doi.org/10.5194/bg-19-5553-2022>
- Dinno, A. (2017). *dunn.test: Dunn's test of multiple comparisons using rank sums* (R package version 1.3.5). <https://CRAN.R-project.org/package=dunn.test>
- Dodge, J. D. (1981). Three new generic names in the Dinophyceae: Herdmania, Sclerodinium and Triadinium to replace Heteraulacus and Goniidoma. *British Phycological Journal*, 16(3), 273–280. <https://doi.org/10.1080/00071618100650291>
- Dore, J. E., Letelier, R. M., Church, M. J., Lukas, R., & Karl, D. M. (2008). Summer phytoplankton blooms in the oligotrophic North Pacific Subtropical Gyre: Historical perspective and recent observations. *Progress in Oceanography*, 76(1), 2–38. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.10.002>

- Doty, M. S., & Oguri, M. (1956). The island mass effect. *ICES Journal of Marine Science*, 22(1), 33–37. <https://doi.org/10.1093/icesjms/22.1.33>
- Dower, J., Freeland, H., & Juniper, K. (1992). A strong biological response to oceanic flow past Cobb Seamount. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 39(7–8), 1139–1145. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(92\)90061-W](https://doi.org/10.1016/0198-0149(92)90061-W)
- Duarte, C. M., Middelburg, J. J., & Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.5194/bg-2-1-2005>
- Dutkiewicz, S., Cermeno, P., Jahn, O., Follows, M. J., Hickman, A. E., Taniguchi, D. A. A., & Ward, B. A. (2020). Dimensions of marine phytoplankton diversity. *Biogeosciences*, 17(3), 609–634. <https://doi.org/10.5194/bg-17-609-2020>
- Edler, L., & Elbrächter, M. (2010). The Utermöhl method for quantitative phytoplankton analysis. In B. Karlson, C. Cusack, & E. Bresnan (Eds.), *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis* (pp. 13–20). UNESCO.
- Eppley, R. W. (1972). Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*, 70(4), 1063–1085.
- Eppley, R. W. (1977). The growth and culture of diatoms. *The biology of diatoms*, 24–64.
- Escobar-Morales, S., & Hernández-Becerril, D. U. (2015). Free-living marine planktonic unarmoured dinoflagellates from the Gulf of Mexico and the Mexican Pacific. *Botanica Marina*, 58(1), 9–22. <https://doi.org/10.1515/bot-2014-0049>
- Evagelopoulos, A. (2002). Taxonomic notes on Protoperidinium (Peridinales, Dinophyceae) species in the Thermaikos Bay (North Aegean Sea, Greece). *Mediterranean Marine Science*, 3(2), 41. <https://doi.org/10.12681/mms.247>
- Falkowski, P. (2012). Ocean science: The power of plankton. *Nature*, 483(7387), S17–S20. <https://doi.org/10.1038/483S17a>
- Falkowski, P., Barber, R., & Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and *feedbacks* on ocean primary production. *Science*, 281(5374), 200–207.
- Falkowski, P. G., Katz, M. E., Knoll, A. H., Quigg, A., Raven, J. A., Schofield, O., & Taylor, F. J. R. (2004). The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, 305(5682), 354–360. <https://doi.org/10.1126/science.1095964>
- Falkowski, P. G., Laws, E. A., Barber, R. T., & Murray, J. W. (2003). Phytoplankton and their role in primary, new, and export production. In M. J. R. Fasham (Ed.), *Ocean biogeochemistry* (pp. 99–121). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-55844-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55844-3_5)
- Falkowski, P. G., Ziemann, D., Kolber, Z., & Bienfang, P. K. (1991). Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*, 352(6330), 55–58. <https://doi.org/10.1038/352055a0>

- Falkowski, P. G., e LaRoche, J. (1991). Acclimation to spectral irradiance in algae. *Journal of Phycology*, 27(1), 8–14. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1991.00008.x>
- Fehling, J., Stoecker, D., & Baldauf, S. L. (2007). Photosynthesis and the eukaryote tree of life. In P. G. Falkowski & A. H. Knoll (Eds.), *Evolution of primary producers in the sea* (pp. 75–107). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012370518-1/50007-2>
- Felip, M., & Catalán, J. (2000). The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: Decoupling in their spatial and temporal maxima. *Journal of Plankton Research*, 22(1), 91–106. <https://doi.org/10.1093/plankt/22.1.91>
- Fennel, K., & Boss, E. (2003). Subsurface maxima of phytoplankton and chlorophyll: Steady-state solutions from a simple model. *Limnology and Oceanography*, 48(4), 1521–1534. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.4.1521>
- Fensome, R. A., Saldarriaga, J. F., & Taylor, F. J. R. (1999). Dinoflagellate phylogeny revisited: Reconciling morphological and molecular based phylogenies. *Grana*, 38(2–3), 66–80. <https://doi.org/10.1080/00173139908559216>
- Fernández-González, C., Tarran, G. A., Schuback, N., Woodward, E. M. S., Aristegui, J., & Marañón, E. (2022). Phytoplankton responses to changing temperature and nutrient availability are consistent across the tropical and subtropical Atlantic. *Communications Biology*, 5(1), 342. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03971-z>
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237–240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>
- Finlay, B. (2002). Hypothesis: The rate and scale of dispersal of freshwater diatom species is a function of their global abundance. *Protist*, 153(3), 261–273. <https://doi.org/10.1078/1434-4610-00103>
- Flynn, K. J., Stoecker, D. K., Mitra, A., Raven, J. A., Glibert, P. M., Hansen, P. J., Granéli, E., & Burkholder, J. M. (2013). Misuse of the phytoplankton–zooplankton dichotomy: The need to assign organisms as mixotrophs within plankton functional types. *Journal of Plankton Research*, 35(1), 3–11. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbs062>
- Follett, C. L., Dutkiewicz, S., Karl, D. M., Inomura, K., & Follows, M. J. (2018). Seasonal resource conditions favor a summertime increase in North Pacific diatom–diazotroph associations. *The ISME Journal*, 12(6), 1543–1557. <https://doi.org/10.1038/s41396-017-0012-x>
- Fonseca, B. M., Ferragut, C., Tucci, A., Crossetti, L. O., Ferrari, F., Bicudo, D. D. C., Sant’Anna, C. L., & Bicudo, C. E. D. M. (2014). Biovolume de cianobactérias e algas de reservatórios tropicais do Brasil com diferentes estados tróficos. *Hoehnea*, 41(1), 9–30. <https://doi.org/10.1590/S2236-89062014000100002>

- Franks, P. J. S. (2015). Has Sverdrup's critical depth hypothesis been tested? Mixed layers vs. turbulent layers. *ICES Journal of Marine Science*, 72(6), 1897–1907. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu175>
- Geider, R. J. (1987). Light and temperature dependence of the carbon to chlorophyll a ratio in microalgae and cyanobacteria: Implications for physiology and growth of phytoplankton. *New Phytologist*, 106(1), 1–34. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04788.x>
- Geider, R., MacIntyre, H., & Kana, T. (1997). Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: Responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a:carbon ratio to light, nutrient-limitation and temperature. *Marine Ecology Progress Series*, 148, 187–200. <https://doi.org/10.3354/meps148187>
- Genin, A., & Boehlert, G. W. (1985). *Dynamics of temperature and chlorophyll structures above a seamount: an oceanic experiment*. *Journal of Marine Research*, 43(4), 907–924. <https://doi.org/10.1357/002224085788453868>
- George, K. H. (Chief Scientist). (2018). *Controls in benthic and pelagic BIODiversity of the AZores (BIODIAZ), Cruise No. M150: 27.08.2018 – 02.10.2018, Cádiz (Spain) – Ponta Delgada, São Miguel (Azores)* [Cruise report, 74 pp.]. METEOR-Berichte, Gutachterpanel Forschungsschiffe, M150. [https://doi.org/10.2312/cr\\_m150](https://doi.org/10.2312/cr_m150)
- Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2011). Nonparametric statistical inference. Em M. Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 977–979). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2\\_420](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_420)
- Gilmartin, M., & Revelante, N. (1974). The 'island mass' effect on the phytoplankton and primary production of the Hawaiian Islands. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 16(2), 181–204. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(74\)90019-7](https://doi.org/10.1016/0022-0981(74)90019-7)
- Glibert, P. M., & Mitra, A. (2022). From webs, loops, shunts, and pumps to microbial multitasking: Evolving concepts of marine microbial ecology, the mixoplankton paradigm, and implications for a future ocean. *Limnology and Oceanography*, 67(3), 585–597. <https://doi.org/10.1002/lno.12018>
- Gómez, F. (2012). A checklist and classification of living dinoflagellates (Dinoflagellata, Alveolata). *CICIMAR Oceanídes*, 27(1), 65–140. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v27i1.111>
- Gómez, F. (2013). Reinstatement of the dinoflagellate genus *Triplos* to replace *Neoceratium*, marine species of *Ceratium* (Dinophyceae, Alveolata). *CICIMAR Oceanídes*, 28(1), 1–22. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v28i1.119>
- Gómez, F. (2018). A review on the synonymy of the dinoflagellate genera *oxytoxum* and *corythodinium* (xytoxaceae, Dinophyceae). *Nova Hedwigia*, 107(1–2), 141–165. [https://doi.org/10.1127/nova\\_hedwigia/2017/0460](https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2017/0460)

- Gómez, F. (2020). Diversity and classification of dinoflagellates. Em D. V. S. Rao (Ed.), *Dinoflagellates* (pp. 1–60). Nova Science Publishers. Disponível em [ResearchGate](#)
- Gómez, F. (2021). Speciation and infrageneric classification in the planktonic dinoflagellate *Triplos* (Gonyaulacales, Dinophyceae). *Current Chinese Science*, 1(3), 346–372. <https://doi.org/10.2174/2210298101999210101231020>
- Gómez, F., Moreira, D., & López-García, P. (2009). Morphology and molecular phylogeny of the marine dinoflagellates *Torodinium* and *Pavillardia* (Dinophyceae). *European Journal of Protistology*, 45(1), 1–14.
- Gómez, F., Moreira, D., & López-García, P. (2010). *Neoceratium* gen. nov., a new genus for all marine species currently assigned to *Ceratium* (Dinophyceae). *Protist*, 161(1), 35–54. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2009.06.004>
- Gómez, F., Takayama, H., Moreira, D., & López-García, P. (2016). Unarmoured dinoflagellates with a small hyposome: *Torodinium* and *Lebouridinium* gen. nov. for *Katodinium glaucum* (Gymnodiniales, Dinophyceae). *European Journal of Phycology*, 51(2), 226–241. <https://doi.org/10.1080/09670262.2015.1126767>
- Gonçalves, V., Marques, H. S., & Raposeiro, P. M. (2015). Diatom assemblages and their associated environmental drivers in isolated oceanic island streams (Azores archipelago as case study). *Hydrobiologia*, 751(1), 89–103. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2174-8>
- Gotelli, N. J., & Colwell, R. K. (2001). Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters*, 4(4), 379–391. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00230.x>
- Gould, W. J. (1985). Physical oceanography of the Azores front. *Progress in Oceanography*, 14, 167–190. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(85\)90010-2](https://doi.org/10.1016/0079-6611(85)90010-2)
- Gove, J. M., McManus, M. A., Neuheimer, A. B., Polovina, J. J., Drazen, J. C., Smith, C. R., Merrifield, M. A., Friedlander, A. M., Ehses, J. S., Young, C. W., Dillon, A. K., & Williams, G. J. (2016). Near-island biological hotspots in barren ocean basins. *Nature Communications*, 7, 10581. <https://doi.org/10.1038/ncomms10581>
- Gower, J. C. (1966). Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika*, 53(3–4), 325–338. <https://doi.org/10.1093/biomet/53.3-4.325>
- Graff, J., & Menden-Deuer, S. (2016). Physical and optical properties of phytoplankton-rich layers in a coastal fjord: A step toward prediction and strategic sampling of plankton patchiness. *Marine Ecology Progress Series*, 544, 1–14. <https://doi.org/10.3354/meps11601>
- Graff, J. R., Westberry, T. K., Milligan, A. J., Brown, M. B., Dall'Olmo, G., Dongen-Vogels, V. V., Reifel, K. M., & Behrenfeld, M. J. (2015). Analytical phytoplankton carbon measurements

- spanning diverse ecosystems. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 102, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.04.006>
- Guidi, L., Stemmann, L., Jackson, G. A., Ibanez, F., Claustre, H., Legendre, L., Picheral, M., & Gorsky, G. (2009). Effects of phytoplankton community on production, size, and export of large aggregates: A world-ocean analysis. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 1951–1963. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.1951>
- Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (2024). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, University of Galway. Consultado entre os dias 15 de fevereiro e 30 de julho de 2024, em <https://www.algaebase.org>
- Guo, S., Wang, F., Liang, J., Zhang, K., & Sun, X. (2023). Phytoplankton carbon biomass: Insights from the eastern Indian Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 202, 104190. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104190>
- Hallegraeff, G. M. (1993). A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32(2), 79–99. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-32-2-79.1>
- Hallegraeff, G. M. (2010). Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: A formidable predictive challenge. *Journal of Phycology*, 46(2), 220–235. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00815.x>
- Hallegraeff, G. M., McCausland, M. A., & Brown, R. K. (1995). Early warning of toxic dinoflagellate blooms of *Gymnodinium catenatum* in southern Tasmanian waters. *Journal of Plankton Research*, 17(6), 1163–1176. <https://doi.org/10.1093/plankt/17.6.1163>
- Handy, S. M., Bachvaroff, T. R., Timme, R. E., Coats, D. W., Kim, S., & Delwiche, C. F. (2009). Phylogeny of four dinophysicean genera (Dinophyceae, Dinophysiales) based on rDNA sequences from single cells and environmental samples. *Journal of Phycology*, 45(5), 1163–1174. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2009.00738.x>
- Hansen, H. P., & Koroleff, F. (1999). Determination of nutrients. In K. Grasshoff, K. Kremling, & M. Ehrhardt (Eds.), *Methods of Seawater Analysis* (3.<sup>a</sup> ed., pp. 159–228). Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-29589-5. <https://doi.org/10.1002/9783527613984.ch10>
- Harrell, F. E., Jr., & Dupont, C. (2023). *Hmisc: Harrell miscellaneous* (R package version 5.x). <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>
- Harris, G. P. (1988). Structural aspects of phytoplankton successions. *SIL Proceedings, 1922–2010*, 23(4), 2221–2225. <https://doi.org/10.1080/03680770.1987.11899879>
- Harrison, P. J., Zingone, A., Mickelson, M. J., Lehtinen, S., Ramaiah, N., Kraberg, A. C., Sun, J., McQuatters-Gollop, A., & Jakobsen, H. H. (2015). Cell volumes of marine phytoplankton from globally distributed coastal data sets. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 162, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.026>

- Hasle, G. R., Syvertsen, E. E., Steidinger, K. A., Tangen, K., & Tomas, C. R. (1996). *Identifying marine diatoms and dinoflagellates*. Elsevier.
- Head, R. N., Medina, G., Huskin, I., Anadon, R., & Harris, R. P. (2002). Phytoplankton and mesozooplankton distribution and composition during transects of the Azores Subtropical Front. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(19), 4023–4034. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00140-6)
- Heinrichs, A. L., Hardorp, O. J., Hillebrand, H., Schott, T., & Striebel, M. (2024). Direct and indirect cumulative effects of temperature, nutrients, and light on phytoplankton growth. *Ecology and Evolution*, 14(8). <https://doi.org/10.1002/ece3.70073>
- Henson, S. A., Sanders, R., Madsen, E., Morris, P. J., Le Moigne, F., & Quartly, G. D. (2011). A reduced estimate of the strength of the ocean's biological carbon pump. *Geophysical Research Letters*, 38(4), L04606. <https://doi.org/10.1029/2011GL046735>
- Hillebrand, H., Dürselen, C., Kirschtel, D., Pollinger, U., & Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35(2), 403–424. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x>
- Hillebrand, H., & Sommer, U. (1997). Response of epilithic microphytobenthos of the Western Baltic Sea to *in situ* experiments with nutrient enrichment. *Marine Ecology Progress Series*, 160, 35–46. <https://doi.org/10.3354/meps160035>
- Hoppenrath, M. (2017). Dinoflagellate taxonomy—A review and proposal of a revised classification. *Marine Biodiversity*, 47(2), 381–403. <https://doi.org/10.1007/s12526-016-0471-8>
- Hoppenrath, M., Chomérat, N., Horiguchi, T., Schweikert, M., Nagahama, Y., & Murray, S. (2013). Taxonomy and phylogeny of the benthic *Prorocentrum* species (Dinophyceae)—A proposal and review. *Harmful Algae*, 27, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2013.03.006>
- Hoppenrath, M., Elbrächter, M., & Drebes, G. (2009). *Marine phytoplankton*. Kleine Senckenberg-Reihe.
- Hoppenrath, M., Kretschmar, A. L., Kaufmann, M. J., & Murray, S. A. (2019). Morphological and molecular phylogenetic identification and record verification of *Gambierdiscus excentricus* (Dinophyceae) from Madeira Island (NE Atlantic Ocean). *Marine Biodiversity Records*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s41200-019-0175-4>
- Hoppenrath, M., Murray, S. A., Chomérat, N., & Horiguchi, T. (2014). *Marine benthic dinoflagellates – Unveiling their worldwide biodiversity* (Vol. 54). Schweizerbart Science Publishers.
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>

- Huskin, I. (2001). Mesozooplankton distribution and copepod grazing in the subtropical Atlantic near the Azores: Influence of mesoscale structures. *Journal of Plankton Research*, 23(7), 671–691. <https://doi.org/10.1093/plankt/23.7.671>
- Iwataki, M. (2008). Taxonomy and identification of the armored dinoflagellate genus *Heterocapsa* (Peridiniales, Dinophyceae). *Plankton and Benthos Research*, 3(3), 135–142. <https://doi.org/10.3800/pbr.3.135>
- Jaanus, A., Toming, K., Hällfors, S., Kaljurand, K., & Lips, I. (2009). Potential phytoplankton indicator species for monitoring Baltic coastal waters in the summer period. In J. H. Andersen & D. J. Conley (Eds.), *Eutrophication in coastal ecosystems: Towards better understanding and management strategies* (pp. 157–168). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3385-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3385-7_14)
- Josse, J., & Husson, F. (2016). *missMDA: A package for handling missing values in multivariate data analysis*. *Journal of Statistical Software*, 70(1), 1–31. <https://doi.org/10.18637/jss.v070.i01>
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J. J., Boyd, P. W., Duce, R. A., Hunter, K. A., Kawahata, H., Kubilay, N., LaRoche, J., Liss, P. S., Mahowald, N., Prospero, J. M., Ridgwell, A. J., Tegen, I., & Torres, R. (2005). Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308(5718), 67–71. <https://doi.org/10.1126/science.1105959>
- Juliano, M. F., & Alves, M. L. G. R. (2007). The Atlantic Subtropical Front/Current Systems of Azores and St. Helena. *Journal of Physical Oceanography*, 37(11), 2573–2598. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3150.1>
- Kaczmarek, I., Ehrman, J. M., & Bates, S. S. (2000). A review of auxospore structure, ontogeny and diatom phylogeny. In E. F. Stoermer & J. P. Smol (Eds.), *The diatom: Applications for the environmental and earth sciences* (pp. 153–168). Cambridge University Press.
- Kämpf, J. (2024). On the wind-driven formation of plankton patches in island wakes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 193. <https://doi.org/10.3390/jmse12010193>
- Kaufmann, M. J., Santos, F., & Maranhão, M. (2015). Checklist of nanno- and microphytoplankton off Madeira Island (Northeast Atlantic) with some historical notes. *Nova Hedwigia*, 101(1–2), 205–232. [https://doi.org/10.1127/nova\\_hedwigia/2015/0265](https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2015/0265)
- Kaufmann, M., Springer, B., Krahnemann, G., & George, K. H. (2020). Physical oceanography (CTD) during Meteor cruise M150 (p. 445770 data points) [Text/tab-separated-values]. *PANGAEA*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.923929>
- Keeling, P. J. (2004). Diversity and evolutionary history of plastids and their hosts. *American Journal of Botany*, 91(10), 1481–1493. <https://doi.org/10.3732/ajb.91.10.1481>

- Kiriakoulakis, K., Vilas, J. C., Blackbird, S. J., Aristegui, J., & Wolff, G. A. (2009). Seamounts and organic matter—Is there an effect? The case of Sedlo and Seine seamounts, Part 2. Composition of suspended particulate organic matter. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(25), 2631–2645. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.024>
- Klein, B., & Siedler, G. (1989). On the origin of the Azores Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C5), 6159–6168. <https://doi.org/10.1029/JC094iC05p06159>
- Körtzinger, A., Send, U., Lampitt, R. S., Hartman, S., Wallace, D. W. R., Karstensen, J., Villagarcia, M. G., Llinás, O., & DeGrandpre, M. D. (2008). The seasonal pCO<sub>2</sub> cycle at 49°N/16.5°W in the northeastern Atlantic Ocean and what it tells us about biological productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C4), C04020. <https://doi.org/10.1029/2007JC004347>
- Kraberg, A., & Stern, R. (2017). Phytoplankton: Diatoms. In C. Castellani & M. Edwards (Eds.), *Marine plankton: A practical guide to ecology, methodology, and taxonomy* (p. 151). Oxford University Press.
- Kretschmann, J., Elbrächter, M., Zinssmeister, C., Soehner, S., Kirsch, M., Kusber, W.-H., & Gottschling, M. (2015). Taxonomic clarification of the dinophyte *Peridinium acuminatum* Ehrenb., ≡ *Scrippsiella acuminata*, comb. nov. (Thoracosphaeraceae, Peridinales). *Phytotaxa*, 220(3), 239–256. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.220.3.3>
- Lafon, V., Martins, A., Figueiredo, M., Melo Rodrigues, M. A., Bashmachnikov, I., Mendonça, A., Macedo, L., & Goulart, N. (2004). Sea surface temperature distribution in the Azores region. Part I: AVHRR imagery and in situ data processing. *Arquipélago. Life and Marine Sciences*, 21A, 1–18.
- Le Fèvre, J. (1986). Aspects of the biology of frontal systems. In *Advances in marine biology* (Vol. 23, pp. 163–299). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60109-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60109-1)
- Leblanc, K., Aristegui, J., Armand, L., Assmy, P., Beker, B., Bode, A., Breton, E., Cornet, V., Gibson, J., Gosselin, M.-P., Kopczynska, E., Marshall, H., Peloquin, J., Piontkovski, S., Poulton, A. J., Quéguiner, B., Schiebel, R., Shipe, R., Stefels, J., ... Yallop, M. (2012). A global diatom database – Abundance, biovolume and biomass in the world ocean. *Earth System Science Data*, 4(1), 149–165. <https://doi.org/10.5194/essd-4-149-2012>
- Leitner, A. B., Neuheimer, A. B., Donlon, C. J., & Sutton, P. J. H. (2020). Evidence for long-term seamount-induced chlorophyll enhancements. *Scientific Reports*, 10(1), 14594. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69564-0>
- Letelier, R. M., Karl, D. M., Abbott, M. R., & Bidigare, R. R. (2004). Light driven seasonal patterns of chlorophyll and nitrate in the lower euphotic zone of the North Pacific Subtropical Gyre. *Limnology and Oceanography*, 49(2), 508–519. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.2.0508>

- Leterme, S., Seuront, L., & Edwards, M. (2006). Differential contribution of diatoms and dinoflagellates to phytoplankton biomass in the NE Atlantic Ocean and the North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 312, 57–65. <https://doi.org/10.3354/meps312057>
- Li, Y., Boonprakob, A., Gaonkar, C. C., Kooistra, W. H. C. F., Lange, C. B., Hernández-Becerril, D., Chen, Z., Moestrup, Ø., & Lundholm, N. (2017). Diversity in the globally distributed diatom genus *Chaetoceros* (Bacillariophyceae): Three new species from warm-temperate waters. *PLOS ONE*, 12(1), e0168887. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168887>
- Linacre, L., Sánchez-Robles, C., Mirabal-Gómez, U., Lara-Lara, J. R., & Bazán-Guzmán, C. (2021). Cell carbon content and biomass assessments of dinoflagellates and diatoms in the oceanic ecosystem of the Southern Gulf of Mexico. *PLOS ONE*, 16(2), e0247071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247071>
- Liu, X., Zhao, X., Sun, J., Yue, S., Yan, W., Wen, Y., & Wu, X. (2024). Picophytoplankton is the main contributor to living carbon and biogenic silica stocks in the oligotrophic Eastern Indian Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1449869. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1449869>
- Lombard, F., Boss, E., Waite, A. M., Vogt, M., Uitz, J., Stemmann, L., Sosik, H. M., Schulz, J., Romagnan, J.-B., Picheral, M., Pearlman, J., Ohman, M. D., Niehoff, B., Möller, K. O., Miloslavich, P., Lara-López, A., Kudela, R., Lopes, R. M., Kiko, R., ... Appeltans, W. (2019). Globally consistent quantitative observations of planktonic ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 6, 196. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00196>
- Lommer, M., Specht, M., Roy, A.-S., Kraemer, L., Andreson, R., Gutowska, M. A., Wolf, J., Bergner, S. V., Schilhabel, M. B., Klostermeier, U. C., Beiko, R. G., Rosenstiel, P., Hippler, M., & LaRoche, J. (2012). Genome and low-iron response of an oceanic diatom adapted to chronic iron limitation. *Genome Biology*, 13(7), R66. <https://doi.org/10.1186/gb-2012-13-7-r66>
- Longhurst, A. (1995). Seasonal cycles of pelagic production and consumption. *Progress in Oceanography*, 36(2), 77–167. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(95\)00015-1](https://doi.org/10.1016/0079-6611(95)00015-1)
- Longhurst, A. (1998). Cod: Perhaps if we all stood back a bit? *Fisheries Research*, 38(2), 101–108. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(98\)00152-0](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(98)00152-0)
- Lundholm, N., Daugbjerg, N., & Moestrup, Ø. (2002). Phylogeny of the Bacillariaceae with emphasis on the genus *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) based on partial LSU rDNA. *European Journal of Phycology*, 37(1), 115–134. <https://doi.org/10.1017/S096702620100347X>
- Luz, R., Cordeiro, R., Fonseca, A., Raposeiro, P. M., & Gonçalves, V. (2022). Distribution and diversity of cyanobacteria in the Azores Archipelago: An annotated checklist. *Biodiversity Data Journal*, 10, e87638. <https://doi.org/10.3897/BDJ.10.e87638>

- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing.
- Malviya, S., Scalco, E., Audic, S., Vincent, F., Veluchamy, A., Poulain, J., ... Bowler, C. (2016). Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(11), E1516–E1525. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509523113>
- Mann, D. G. (1999). The species concept in diatoms. *Phycologia*, 38(6), 437–495. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-38-6-437.1>
- Mann, D. G., & Vanormelingen, P. (2013). An inordinate fondness? The number, distributions, and origins of diatom species. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 60(4), 414–420. <https://doi.org/10.1111/jeu.12047>
- Marañón, E. (2015). Cell size as a key determinant of phytoplankton metabolism and community structure. *Annual Review of Marine Science*, 7(1), 241–264. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015955>
- Marañón, E., Behrenfeld, M., González, N., Mouriño, B., & Zubkov, M. (2003). High variability of primary production in oligotrophic waters of the Atlantic Ocean: Uncoupling from phytoplankton biomass and size structure. *Marine Ecology Progress Series*, 257, 1–11. <https://doi.org/10.3354/meps257001>
- Marañón, E., Cermeño, P., Latasa, M., & Tadonlécé, R. D. (2012). Temperature, resources, and phytoplankton size structure in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 57(5), 1266–1278. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.5.1266>
- Marañón, E., Fernandez, A., Mourino-Carballido, B., Martinez-Garcia, S., Teira, E., Huete-Ortega, M., & Cermeño, P. (2021). Deep maxima of phytoplankton biomass, primary production and bacterial production in the ocean. *Progress in Oceanography*, 193, 102552. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102552>
- Marañón, E., & Holligan, P. (1999). Photosynthetic parameters of phytoplankton from 50°N to 50°S in the Atlantic Ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 176, 191–203. <https://doi.org/10.3354/meps176191>
- Marañón, E., Holligan, P., Barciela, R., González, N., Mouriño, B., Pazó, M., & Varela, M. (2001). Patterns of phytoplankton size structure and productivity in contrasting open-ocean environments. *Marine Ecology Progress Series*, 216, 43–56. <https://doi.org/10.3354/meps216043>
- Marañón, E., Holligan, P. M., Varela, M., Mouriño, B., & Bale, A. J. (2000). Basin-scale variability of phytoplankton biomass, production and growth in the Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 47(5), 825–857. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00087-4)

- Marañón, E., Lorenzo, M. P., Cermeño, P., & Mouriño-Carballido, B. (2014). Nutrient limitation suppresses the temperature dependence of phytoplankton metabolic rates. *The ISME Journal*, 8, 939–949. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.199>
- Martin, B., & Christiansen, B. (2009). Distribution of zooplankton biomass at three seamounts in the NE Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(25), 2671–2682. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.026>
- Martins, C. S., Fiúza, A. F. G., Ambar, I., & Santos, H. A. (2007). Surface circulation in the eastern North Atlantic from drifters and altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11), C11011. <https://doi.org/10.1029/2000JC000345>
- National Hurricane Center. (2018, September 15). *Hurricane Helene public advisory number 37*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.nhc.noaa.gov/archive/2018/al08/al082018.public.037.shtml?text>
- McDermott, G., & Raine, R. (2010). Settlement bottle method for quantitative phytoplankton analysis. In B. Karlson, C. Cusack, & E. Bresnan (Eds.), *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis* (pp. 21–24). UNESCO. CONFIRMAR AS PÁGINAS DO LIVRO
- McGillicuddy, D. J., Anderson, L. A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K. O., Carlson, C. A., Davis, C. S., Ewart, C., Falkowski, P. G., Goldthwait, S. A., Hansell, D. A., Jenkins, W. J., Johnson, R., Kosnyrev, V. K., Ledwell, J. R., Li, Q. P., Siegel, D. A., & Steinberg, D. K. (2007). Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science*, 316(5827), 1021–1026. <https://doi.org/10.1126/science.1136256>
- Medlin, L. K., & Kaczmarek, I. (2004). Evolution of the diatoms: V. Morphological and cytological support for the major clades and a taxonomic revision. *Phycologia*, 43(3), 245–270. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-43-3-245.1>
- Medlin, L. K., Kooistra, W. H., Gersonde, R., & Wellbrock, U. (1996). Evolution of the diatoms (Bacillariophyta). II. Nuclear-encoded small-subunit rRNA sequence comparisons confirm a paraphyletic origin for the centric diatoms. *Molecular Biology and Evolution*, 13(1), 67–75. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a025571>
- Menden-Deuer, S., & Lessard, E. J. (2000). Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. *Limnology and Oceanography*, 45(3), 569–579. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0569>
- Menden-Deuer, S., Lessard, E., & Satterberg, J. (2001). Effect of preservation on dinoflagellate and diatom cell volume, and consequences for carbon biomass predictions. *Marine Ecology Progress Series*, 222, 41–50. <https://doi.org/10.3354/meps222041>
- Mendonça, A., Aristegui, J., Vilas, J., Montero, M., Ojeda, A., Espino, M., & Martins, A. (2012). Is there a seamount effect on microbial community structure and biomass? The case study

- of Seine and Sedlo Seamounts (Northeast Atlantic). *PLoS ONE*, 7, e29526. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029526>
- Mignot, A., Claustre, H., Uitz, J., Poteau, A., D'Ortenzio, F., & Xing, X. (2014). Understanding the seasonal dynamics of phytoplankton biomass and the deep chlorophyll maximum in oligotrophic environments: A Bio-Argo float investigation. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(8), 856–876. <https://doi.org/10.1002/2013GB004781>
- Moestrup, Ø., Hakanen, P., Hansen, G., Daugbjerg, N., & Ellegaard, M. (2014). On *Levanderina fissa* gen. et comb. nov. (Dinophyceae) (syn. *Gymnodinium fissum*, *Gyrodinium instriatum*, *Gyrodinium uncatenum*), a dinoflagellate with a very unusual sulcus. *Phycologia*, 53(3), 265–292. <https://doi.org/10.2216/13-254.1>
- Montagnes, D. J. S., Berges, J. A., Harrison, P. J., & Taylor, F. J. R. (1994). Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 39(5), 1044–1060. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.5.1044>
- Morato, T., Hoyle, S. D., Allain, V., & Nicol, S. J. (2010). Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(21), 9707–9711. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910290107>
- Morato, T., Kvile, K. Ø., Taranto, G. H., Tempera, F., Narayanaswamy, B. E., Hebbeln, D., Menezes, G. M., Wienberg, C., Santos, R. S., & Pitcher, T. J. (2013). Seamount physiography and biology in the north-east Atlantic and Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 10(5), 3039–3054. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3039-2013>
- Morato, T., Varkey, D., Damaso, C., Machete, M., Santos, M., Prieto, R., Pitcher, T., & Santos, R. (2008). Evidence of a seamount effect on aggregating visitors. *Marine Ecology Progress Series*, 357, 23–32. <https://doi.org/10.3354/meps07269>
- Munir, S., Burhan, Z., Naz, T., Morton, S. L., & Siddiqui, P. J. A. (2015). Morphometric forms, biovolume and cellular carbon content of dinoflagellates from polluted waters on the Karachi coast, Pakistan. *Indian Journal of Marine Sciences*, 44.
- Nakamura, Y., Matsuoka, K., Imai, I., Ishii, K., Kuwata, A., Kawachi, M., Kimoto, K., Suzuki, N., Sano, M., Landeira, J. M., Miyamoto, H., Nishikawa, J., & Nishida, S. (2019). Current status on the taxonomy and ecology of plankton. *Bulletin of the Plankton Society of Japan*, 66(1), 22–40. [https://doi.org/10.24763/bpsj.66.1\\_22](https://doi.org/10.24763/bpsj.66.1_22)
- Nanjappa, D., Kooistra, W. H. C. F., & Zingone, A. (2013). A reappraisal of the genus *Leptocylindrus* (Bacillariophyta), with the addition of three new species and the erection of *Tenuicylindrus* gen. nov. *Journal of Phycology*, 49(5), 917–936. <https://doi.org/10.1111/jpy.12102>
- Narciso, Á., Gallo, F., Valente, A., Cachão, M., Cros, L., Azevedo, E. B., & Ramos, J. B. E. (2016). Seasonal and interannual variations in coccolithophore abundance off Terceira Island,

- Azores (Central North Atlantic). *Continental Shelf Research*, 117, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.019>
- Narciso, Á., Springer, B., Lopes Silva, T., & Kaufmann, M. (dados não publicados). Biomassa nanofitoplanctónica no arquipélago dos Açores.
- Narciso, Á., Springer, B., Lopes Silva, T., & Kaufmann, M. (2022, fevereiro). M150 – BIODIAZ Calcareous nannophytoplankton distribution around the Azores archipelago (Central Atlantic Ocean) [Póster]. *Status Conference Research Vessels 2022*.
- Nelson, D. M., Tréguer, P., Brzezinski, M. A., Leynaert, A., & Quéguiner, B. (1995). Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(3), 359–372. <https://doi.org/10.1029/95GB01070>
- Nemésio, V. (2018). *Correspondência ao mar*. Em L. M. F. Duarte (Ed.), *Poesia (1916–1940)* [E book]. Imprensa Nacional Casa da Moeda, Companhia das Ilhas. (Trabalho original publicado em 1938, em *O Bicho Harmonioso*).
- Nybakken, J. W., & Bertness, M. D. (2005). *Marine biology: An ecological approach* (6th ed.). Pearson Benjamin Cummings.
- Ogle, D. H., Wheeler, P., & Dinno, A. (2022). *FSA: Fisheries Stock Analysis*. <https://CRAN.R-project.org/package=FSA>
- Ojeda, A. (2011). *Diatomeas de las aguas costeras de las Islas Canarias*. Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información, Gobierno de Canarias.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., & Wagner, H. (2022). *vegan: Community Ecology Package*. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Olenina, I., Hajdu, S., Edler, L., Andersson, A., Wasmund, N., Busch, S., Göbel, J., Gromisz, S., Huseby, S., Huttunen, M., Jaanus, A., Kokkonen, P., Ledaine, I., & Niemkiewicz, E. (2006). *Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea*. HELCOM Baltic Sea Environment Proceedings, No. 106, 144 pp. Helsinki Commission.
- Omura, T., Iwataki, M., Borja, V. M., Takayama, H., & Fukuyo, Y. (2012). *Marine phytoplankton of the Western Pacific*. Kouseisha Kouseikaku.
- Otsuka, A., Noriega, C., Feitosa, F., Borges, G., Montes, M. F., Araujo, M., & Da Gloria Silva-Cunha, M. (2022). Characterization of microphytoplankton associations on the Amazon continental shelf and in the adjacent oceanic region. *Journal of Sea Research*, 189, 102271. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2022.102271>
- Parlamento Europeu e Conselho. (2008). Diretiva 2008/56/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 17 de junho de 2008, que estabelece um quadro de ação comunitária no

- domínio da política para o meio marinho (Diretiva-Quadro Estratégia Marinha). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 164, 19–40.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0056>
- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559–572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Pérez, V., Fernández, E., Marañón, E., Morán, X. A. G., & Zubkov, M. V. (2006). Vertical distribution of phytoplankton biomass, production and growth in the Atlantic subtropical gyres. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(10), 1616–1634. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.07.008>
- Pielou, E. C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131–144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0)
- Pierella Karlusich, J. J., Ibarbalz, F. M., & Bowler, C. (2020). Phytoplankton in the Tara Ocean. *Annual Review of Marine Science*, 12(1), 233–265. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010706>
- Pierella Karlusich, J. J., Pelletier, E., Zinger, L., Lombard, F., Zingone, A., Colin, S., Gasol, J. M., Dorrell, R. G., Henry, N., Scalco, E., Acinas, S. G., Wincker, P., de Vargas, C., & Bowler, C. (2023). A robust approach to estimate relative phytoplankton cell abundances from metagenomes. *Molecular Ecology Resources*, 23(1), 16–40. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13592>
- Pitcher, T. J., Morato, T., Hart, P. J. B., Clark, M. R., Haggan, N., & Santos, R. S. (Eds.). (2007). *Seamounts: Ecology, fisheries & conservation*. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470691953>
- Potapova, M. (2013). The types of 22 *Navicula* (Bacillariophyta) species described by Ruth Patrick. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 162(1), 1–23. <https://doi.org/10.1635/053.162.0101>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Raimbault, P., Coste, B., Boulhadid, M., & Boudjellal, B. (1993). Origin of high phytoplankton concentration in deep chlorophyll maximum (DCM) in a frontal region of the Southwestern Mediterranean Sea (Algerian Current). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(4), 791–804. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(93\)90072-B](https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90072-B)
- Reynolds, C. S. (2006). *The ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press.
- Ricard, M., & Dorst, J. (1987). *Atlas du phytoplancton marin*. Éditions du CNRS.

- Righetti, D., Vogt, M., Zimmermann, N. E., Guiry, M. D., & Gruber, N. (2020). PhytoBase: A global synthesis of open-ocean phytoplankton occurrences. *Earth System Science Data*, 12(2), 907–933. <https://doi.org/10.5194/essd-12-907-2020>
- Rines, J. E. B., & Theriot, E. C. (2003). Systematics of Chaetocerotaceae (Bacillariophyceae). I. A phylogenetic analysis of the family. *Phycological Research*, 51(2), 83–98. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1440-1835.2003.00297.x>
- Round, F. E., Crawford, R. M., & Mann, D. G. (1990). *The Diatoms: Biology & morphology of the genera*. Cambridge University Press.
- Round, F. E., Crawford, R. M., & Mann, D. G. (2007). *The diatoms: Biology & morphology of the genera (Digitally printed version)*. Cambridge University Press.
- Rowden, A. A., Schlacher, T. A., Williams, A., Clark, M. R., Stewart, R., Althaus, F., Bowden, D. A., Conalvey, M., Robinson, W., & Dowdney, J. (2010). A test of the seamount oasis hypothesis: Seamounts support higher epibenthic megafaunal biomass than adjacent slopes. *Marine Ecology*, 31(s1), 95–106. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2010.00369.x>
- Saccà, A. (2016). A Simple yet Accurate Method for the Estimation of the Biovolume of Planktonic Microorganisms. *PLOS ONE*, 11(5), e0151955. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151955>
- Sal, S., López-Urrutia, Á., Irigoien, X., Harbour, D. S., & Harris, R. P. (2013). Marine microplankton diversity database: Ecological Archives E094-149. *Ecology*, 94(7), 1658–1658. <https://doi.org/10.1890/13-0236.1>
- Sala, I., Harrison, C. S., & Caldeira, R. M. A. (2016). The role of the Azores Archipelago in capturing and retaining incoming particles. *Journal of Marine Systems*, 154, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.10.001>
- Salas, R., Tillmann, U., & Kavanagh, S. (2014). Morphological and molecular characterization of the small armoured dinoflagellate *Heterocapsa minima* (Peridinales, Dinophyceae). *European Journal of Phycology*, 49(4), 413–428. <https://doi.org/10.1080/09670262.2014.956800>
- Santos, M., Moita, M. T., Bashmachnikov, I., Menezes, G. M., Carmo, V., Loureiro, C. M., Mendonça, A., Silva, A. F., & Martins, A. (2013). Phytoplankton variability and oceanographic conditions at Condor seamount, Azores (NE Atlantic). *Deep Sea Research Part II*, 98, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.05.037>
- Santos, R. S., Hawkins, S., Monteiro, L. R., Alves, M., & Isidro, E. J. (1995). Marine research, resources and conservation in the Azores. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5, 311–354. <https://doi.org/10.1002/aqc.3270050406>
- Sathyendranath, S., Platt, T., Kovač, Ž., Dingle, J., Jackson, T., Brewin, R. J. W., Franks, P., Marañón, E., Kulk, G., & Bouman, H. A. (2020). Reconciling models of primary production

- and photoacclimation [Invited]. *Applied Optics*, 59(10), C100. <https://doi.org/10.1364/AO.386252>
- Sathyendranath, S., Stuart, V., Nair, A., Oka, K., Nakane, T., Bouman, H., Forget, M., Maass, H., & Platt, T. (2009). Carbon-to-chlorophyll ratio and growth rate of phytoplankton in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 383, 73–84. <https://doi.org/10.3354/meps07998>
- Sato, S., Nanjappa, D., Dorrell, R. G., Vieira, F. R. J., Kazamia, E., Tirichine, L., Veluchamy, A., Heilig, R., Aury, J.-M., Jaillon, O., Wincker, P., Fussy, Z., Obornik, M., Muñoz-Gómez, S. A., Mann, D. G., Bowler, C., & Zingone, A. (2020). Genome-enabled phylogenetic and functional reconstruction of an araphid pennate diatom *Plagiosiriata* sp. CCMP470. *Scientific Reports*, 10(1), 9449. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65941-x>
- Sauzède, R., Lavigne, H., Claustre, H., Uitz, J., Schmechtig, C., D'Ortenzio, F., Guinet, C., & Pesant, S. (2015). Vertical distribution of chlorophyll *a* concentration and phytoplankton community composition from in situ fluorescence profiles. *Earth System Science Data*, 7(2), 261–273. <https://doi.org/10.5194/essd-7-261-2015>
- Savidge, G., Boyd, P., Pomroy, A., Harbour, D., & Joint, I. (1995). Phytoplankton production and biomass estimates in the northeast Atlantic Ocean, May–June 1990. *Deep Sea Research Part I*, 42(5), 599–617. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00016-Y](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00016-Y)
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Schiller, J. (1933). *Dinoflagellatae (Peridineae) in monographischer Behandlung*. In Rabenhorst's *Kryptogamen-Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz* (2<sup>a</sup> ed., Vol. 10, Abt. 3, Parte 1). Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
- Schiller, J. (1937). *Dinoflagellatae (Peridineae) in monographischer Behandlung*. In Rabenhorst's *Kryptogamen-Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz* (2<sup>a</sup> ed., Vol. 10, Abt. 3, Parte 2). Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
- Shin, H. H., Kim, E. S., Li, Z., Youn, J. Y., Jeon, S. G., & Oh, S. J. (2016). Morphological Features of Marine Dinoflagellates from Jangmok Harbour in Jinhae Bay, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology*, 34(3), 141–150. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.3.141>
- Schlitzer, R. (2024). *Ocean Data View* (Versão 5.7.2) [Software]. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. <https://odv.awi.de>
- Silva, A., Brotas, V., Valente, A., Sá, C., Diniz, T., Patarra, R. F., Álvaro, N. V., & Neto, A. I. (2013). Coccolithophore species as indicators of surface oceanographic conditions in the vicinity of Azores islands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 118, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.12.010>

- Silva, A., Palma, S., Oliveira, P. B., & Moita, M. T. (2009). Composition and interannual variability of phytoplankton in a coastal upwelling region (Lisbon Bay, Portugal). *Journal of Sea Research*, 62(4), 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2009.05.001>
- Silva-Fernandes, S. M., & Peliz, A. J. (2020). The Turbulent Structure of the Azores Current System: A Statistical Analysis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(11), e2020JC016327. <https://doi.org/10.1029/2020JC016327>
- Smayda, T. J. (1978). From phytoplankton to biomass. In A. Sournia (Ed.), *Phytoplankton manual* (pp. 273–279). UNESCO.
- Smayda, T. J., & Reynolds, C. S. (2001). Community assembly in marine phytoplankton: Application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *Journal of Plankton Research*, 23(5), 447–461. <https://doi.org/10.1093/plankt/23.5.447>
- Sosik, H. M., Green, R. E., Pegau, W. S., & Roesler, C. S. (2001). Temporal and vertical variability in optical properties of New England shelf waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5), 9455–9472. <https://doi.org/10.1029/2000JC900147>
- Sosik, H. M., & Olson, R. J. (2002). Phytoplankton photophysiology in situ: Insights from fast repetition rate fluorometry. *Deep-Sea Research Part I*, 49(11), 1195–1216.
- Sournia, A. (1978). *Phytoplankton manual. Monographs on Oceanographic Methodology* (Vol. 6). UNESCO.
- Sournia, A. (1986). *Atlas du phytoplancton marin*. Éditions du CNRS.
- Sournia, A., Chrdiennot-Dinet, M.-J., & Ricard, M. (1991). Marine phytoplankton: How many species in the world ocean? *Journal of Plankton Research*, 13(5), 1093–1099. <https://doi.org/10.1093/plankt/13.5.1093>
- Spearman, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Sun, J., & Liu, D. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 25(11), 1331–1346. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbg096>
- Sverdrup, H. U. (1953). On Conditions for the Vernal Blooming of Phytoplankton. *ICES Journal of Marine Science*, 18(3), 287–295. <https://doi.org/10.1093/icesjms/18.3.287>
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). Dynamical processes for descriptive ocean circulation. In *Descriptive physical oceanography* (pp. 1–72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10019-8>
- Taylor, A., & Landry, M. (2018). Phytoplankton biomass and size structure across trophic gradients in the southern California Current and adjacent ocean ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 592, 1–17. <https://doi.org/10.3354/meps12526>

- Taylor, F. J. R., Hoppenrath, M., & Saldarriaga, J. F. (2008). Dinoflagellate diversity and distribution. *Biodiversity and Conservation*, 17(2), 407–418. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9258-3>
- Teira, E., Mouriño, B., Marañón, E., Pérez, V., Pazó, M. J., Serret, P., De Armas, D., Escánez, J., Woodward, E. M. S., & Fernández, E. (2005). Variability of chlorophyll and primary production in the Eastern North Atlantic Subtropical Gyre: Potential factors affecting phytoplankton activity. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(4), 569–588. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.11.007>
- Teng, S. T., Leaw, C. P., Lim, H. C., & Lim, P. T. (2013). The genus *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) in Malaysia, including new records and a key to species inferred from morphology-based phylogeny. *Botanica Marina*, 56(4), 375–398. <https://doi.org/10.1515/bot-2012-0194>
- Tillmann, U., Gottschling, M., Wietkamp, S., & Hoppenrath, M. (2023). Morphological and phylogenetic characterisation of *Prorocentrum spinulentum* sp. nov. (Prorocentrales, Dinophyceae), a small spiny species from the North Atlantic. *Microorganisms*, 11(2), 271. <https://doi.org/10.3390/microorganisms1102027>
- Tillmann, U., Hoppenrath, M., Gottschling, M., Kusber, W., & Elbrächter, M. (2017). Plate pattern clarification of the marine dinophyte *Heterocapsa triquetra* sensu Stein (Dinophyceae) collected at the Kiel Fjord (Germany). *Journal of Phycology*, 53(6), 1305–1324. <https://doi.org/10.1111/jpy.12584>
- Tomas, C. R., & Hasle, G. R. (Eds.). (1997). *Identifying marine phytoplankton*. Academic Press.
- Torstensson, A., Loo, A., Sundqvist, L., Skjevik, A.-T., Karlberg, M., Johansen, M., Andreasson, A., & Karlson, B. (2024). *Nordic Microalgae*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Consultado entre 15 de fevereiro e 30 de julho de 2024, em <http://www.nordicmicroalgae.org>
- Tucker, S. J., Rii, Y. M., Freel, K. C., Kotubetey, K., Kawelo, A. H., Winter, K. B., & Rappé, M. S. (2025). Seasonal and spatial transitions in phytoplankton assemblages spanning estuarine to open ocean waters of the tropical Pacific. *Limnology and Oceanography*, 70(6), 1693–1708. <https://doi.org/10.1002/lno.70075>
- Ulloa, O., & Grob, C. (2009). Marine pelagic ecosystems. In D. L. Kirchman (Ed.), *Microbial ecology of the oceans* (2nd ed., Vol. 187, pp. 119–137). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/2008GM000867>
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie, 9, 1–39.
- Vadrucci, M. R., Cabrini, M., & Basset, A. (2007). Biovolume determination of phytoplankton guilds in transitional water ecosystems of Mediterranean Ecoregion. *Transitional Waters Bulletin*, 1(2), Article 2. <https://doi.org/10.1285/i1825229Xv1n2p83>

- Vadrucci, M. R., Mazziotti, C., & Fiocca, A. (2013). Cell biovolume and surface area in phytoplankton of Mediterranean transitional water ecosystems: Methodological aspects [Dataset]. University of Salento. <https://doi.org/10.1285/I1825229XV7N2P100>
- Vadrucci, M. R., Roselli, L., Castelluccia, D., Di Festa, T., Donadei, D., Florio, M., Longo, E., D'Arpa, S., Maci, F., Ranieri, S., Spinelli, M., Pastorelli, A., & Ungaro, N. (2018). PhytoNumb3rs: An easy-to-use computer toolkit for counting microalgae by the Utermöhl method. *Ecological Informatics*, *46*, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.06.007>
- Valente, A. dos S. F. G. (2013). *Climatic patterns and physical controls of chlorophyll-a in the Northeast Atlantic* [PhD thesis]. Universidade dos Açores.
- van Buuren, S., & Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). mice: Multivariate imputation by chained equations in R. *Journal of Statistical Software*, *45*(3), 1–67. <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>
- van de Poll, W. H., Kulk, G., Timmermans, K. R., Brussaard, C. P. D., van der Woerd, H. J., Kehoe, M. J., Mojica, K. D. A., Visser, R. J. W., Rozema, P. D., & Buma, A. G. J. (2013). Phytoplankton chlorophyll a biomass, composition, and productivity along a temperature and stratification gradient in the northeast Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, *10*(6), 4227–4240. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4227-2013>
- Vargas, C., Audic, S., Henry, N., Decelle, J., Mahé, F., Logares, R., Lara, E., Berney, C., Le Bescot, N., Probert, I., Carmichael, M., Poulain, J., Romac, S., Colin, S., Aury, J.-M., Bittner, L., Chaffron, S., Dunthorn, M., Engelen, S., ... Velayoudon, D. (2015). Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science*, *348*(6237), 1261605. <https://doi.org/10.1126/science.1261605>
- Veldhuis, M. J. W., & Kraay, G. W. (2004). Phytoplankton in the subtropical Atlantic Ocean: Towards a better assessment of biomass and composition. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *51*(4), 507–530. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.12.002>
- Verity, P. G., Robertson, C. Y., Tronzo, C. R., Andrews, M. G., Nelson, J. R., & Sieracki, M. E. (1992). Relationships between cell volume and the carbon and nitrogen content of marine photosynthetic nanoplankton. *Limnology and Oceanography*, *37*(7), 1434–1446. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.7.1434>
- Verlecar, X. N., & Desai, S. R. (2004). *Phytoplankton identification manual*. Goa: National Institute of Oceanography. <https://drs.nio.res.in/drs/handle/2264/97>
- Vilas, J. C., Arístegui, J., Kiriakoulakis, K., Wolff, G. A., Espino, M., Polo, I., Montero, M. F., & Mendonça, A. (2009). Seamounts and organic matter - Is there an effect? The case of Sedlo and Seine Seamounts: Part 1. Distributions of dissolved and particulate organic

- matter. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(25), 2618–2630. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.023>
- Vyverman, W., Verleyen, E., Sabbe, K., Vanhoutte, K., Sterken, M., Hodgson, D. A., Mann, D. G., Juggins, S., Vijver, B. V. D., Jones, V., Flower, R., Roberts, D., Chepurnov, V. A., Kilroy, C., Vanormelingen, P., & Wever, A. D. (2007). Historical processes constrain patterns in global diatom diversity. *Ecology*, 88(8), 1924–1931. <https://doi.org/10.1890/06-1564.1>
- Walczyńska, A., & Sobczyk, Ł. (2017). The underestimated role of temperature–oxygen relationship in large-scale studies on size-to-temperature response. *Ecology and Evolution*, 7(18), 7434–7441. <https://doi.org/10.1002/ece3.3263>
- Waniek, J. J. (2003). The role of physical forcing in initiation of spring blooms in the northeast Atlantic. *Journal of Marine Systems*, 39(1–2), 57–82. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00248-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00248-8)
- Waniek, J. J., Schulz-Bull, D. E., Blanz, T., Prien, R. D., Oschlies, A., & Müller, T. J. (2005). Interannual variability of deep water particle flux in relation to production and lateral sources in the northeast Atlantic. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(1), 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.08.008>
- White, M., Bashmachnikov, I., Aristegui, J., & Martins, A. (2007). Physical processes and seamount productivity. In T. J. Pitcher, T. Morato, P. J. B. Hart, M. R. Clark, N. Haggan, & R. S. Santos (Eds.), *Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation* (pp. 65–84). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch4>
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D., & Brand, T. van den. (2023). *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics*. R package version 3.x. <https://CRAN.R-project.org/package=ggplot2>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.x. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Winter, A., & Siesser, W. G. (1994). *Coccolithophores*. Cambridge University Press.
- Witkowski, A., Ashworth, M., Li, C., Sagna, I., Yatte, D., Górecka, E., Franco, A. O. R., Kusber, W.-H., Klein, G., Lange-Bertalot, H., Dąbek, P., Theriot, E. C., & Manning, S. R. (2020). Exploring diversity, taxonomy and phylogeny of diatoms (Bacillariophyta) from marine habitats: Novel taxa with internal costae. *Protist*, 171(2), 125713. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2020.125713>
- Wolanski, E. (1994). *Physical oceanographic processes of the Great Barrier Reef*. CRC Press.
- Woods, J., & Barkmann, W. (1995). Modelling oligotrophic zooplankton production: Seasonal oligotrophy of the Azores. *ICES Journal of Marine Science*, 52(3–4), 723–734. [https://doi.org/10.1016/1054-3139\(95\)80085-9](https://doi.org/10.1016/1054-3139(95)80085-9)

- WoRMS Editorial Board. (2024). *World Register of Marine Species*. Flanders Marine Institute. <https://doi.org/10.14284/170>. Consultado entre 15 de fevereiro e 30 de julho de 2024, em <https://www.marinespecies.org>
- Wu, Y., Hirai, J., Zhou, F., Iwataki, M., Jiang, S., Ogawa, H., Inoue, J., & Hyodo, S. (2024). Diversity and biogeography of dinoflagellates in the Kuroshio region revealed by 18S rRNA metabarcoding. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1361452>
- Wu, J., Sunda, W., Boyle, E. A., & Karl, D. M. (2000). Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean. *Science*, 289(5480), 759–762. <https://doi.org/10.1126/science.289.5480.759>
- Xi, H., Bretagnon, M., Losa, S. N., Brotas, V., Gomes, M., Peeken, I., Alvarado, L. M. A., Mangin, A., & Bracher, A. (2023). Satellite monitoring of surface phytoplankton functional types in the Atlantic Ocean over 20 years (2002–2021). *State of the Planet*, 1, osr7, 1–13. <https://doi.org/10.5194/sp-1-osr7-5-2023>
- Yun, S.-M., & Lee, J.-H. (2011). Morphology and distribution of some marine diatoms, family Rhizosoleniaceae, genus *Proboscia*, *Neocalyptrella*, *Pseudosolenia*, *Guinardia*, and *Dactyliosolen* in Korean coastal waters. *ALGAE*, 26(4), 299–315. <https://doi.org/10.4490/algae.2011.26.4.299>

## VII. Anexos

As tabelas A-I e B-I, referidas ao longo desta dissertação, encontram-se em formato Excel e são disponibilizadas como ficheiros suplementares na pasta “Material Suplementar” (Tabela A-1.xlsx; Tabela B-1.xlsx), devido às suas dimensões. Cada anexo (Tabela A-I, Anexo A; Tabela B-I, Anexo B) corresponde a um conjunto de duas folhas incluídas nesses ficheiros. Para consulta, recomenda-se a abertura dos ficheiros Excel associados, onde as tabelas estão organizadas de acordo com a ordem e a designação utilizadas no presente trabalho. Estes ficheiros não serão impressos devido à sua extensão, mas permanecem disponíveis para consulta integral na versão digital da dissertação.



## Anexo A

**Tabela A-I:** Base de dados das 31 estações amostradas, incluindo variáveis espaciais e temporais (latitude, longitude, data e hora de amostragem, ilha/monte submarino, profundidade), distância ao ponto de referência/costa, variáveis físico-químicas (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, MLD e nutrientes), condições meteorológicas (velocidade média do vento) e variáveis biológicas (biomassa de carbono e abundância por amostra).



## Anexo B

**Tabela B-I:** Base de dados com 1293 entradas taxonômicas correspondentes à identificação do microfitoplâncton ao nível de grupo (diatomáceas, dinoflagelados), reino, filo, classe, ordem, família, gênero, espécie e grupo morfológico, para as 31 amostras do cruzeiro M150. Inclui variáveis biológicas (abundância, biomassa de carbono e biovolume por célula microfitoplanctônica identificada), físico-químicas (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, profundidade da camada de mistura – MLD – e nutrientes: nitrato + nitrito, fosfato, silicato), ambientais (profundidade da DCM, velocidade média do vento e distância à costa/ponto de referência), bem como coordenadas espaciais (latitude, longitude, profundidade da amostragem) e temporais (data/hora de amostragem).



## Anexos C

**Tabela C-I:** Estatísticas descritivas das variáveis ambientais e nutricionais obtidas nas 31 estações amostradas nas ilhas e montes submarinos dos Açores. Incluem-se os seguintes parâmetros: temperatura (°C), salinidade (PSU), oxigénio dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ ), profundidade da camada de mistura (MLD, m), velocidade média do vento (m/s) e nutrientes (nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\mu\text{M}$ ) e silicato ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\mu\text{M}$ )). Para cada variável, são apresentados os seguintes valores estatísticos: número de observações válidas (N), média, mediana, desvio padrão ( $\pm$ ), valor mínimo, valor máximo, primeiro quartil (Q25), terceiro quartil (Q75) e o número de valores ausentes (NA).

Parâmetro	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Q25	Q75	Valores NA
Temperatura (°C)	31	18.36	17.96	1.065	16.84	20.46	17.56	19.17	0
Salinidade (PSU)	31	36.21	36.21	0.053	36.09	36.3	36.16	36.25	0
O <sub>2</sub> dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ )	31	238.49	237.52	5.902	226.16	252.23	234.44	242.77	0
Velocidade média do vento (m/s)	31	5.69	5.87	3.265	0.77	12.03	2.6	8.917	0
MLD (m)	31	17.23	16	5.69	10	38	13	18.5	0
$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{M}$ )	22	0.98	0.8	0.617	0.22	2.03	0.4	1.524	9
$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\mu\text{M}$ )	22	0.24	0.24	0.147	0	0.57	0.14	0.291	9
$\text{Si}(\text{OH})_4$ ( $\mu\text{M}$ )	22	0.04	0	0.067	0	0.24	0	0.04	9



**Tabela C-II:** Resultados do teste de *Kruskal-Wallis* aplicado aos parâmetros físico-químicos e ambientais medidos nas 5 regiões. O teste avalia a existência de diferenças estatísticas entre grupos para cada parâmetro considerado.

<b>Parâmetro</b>	<b>p-valor</b>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µM)	0.546
MLD (m)	0.357
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	0.185
O <sub>2</sub> dissolvido (µmol/kg)	0.174
Salinidade (PSU)	<b>0.00255</b>
Si (OH) <sub>4</sub> (µM)	0.421
Temperatura (°C)	0.153
Velocidade média do vento (m/s)	0.201



**Tabela C-III:** Estatísticas descritivas dos parâmetros físico-químicos e nutrientes, agrupadas por categorias de distância (“Próximo” e “Afastado”) em relação à mediana da distância (6.8 km) entre as estações de amostragem e o ponto costeiro mais próximo. São apresentados os valores de temperatura da água (°C), salinidade prática (PSU), oxigênio dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), nitrato + nitrito ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ) e silicato ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ), expressos em micromolar ( $\mu\text{M}$ ), bem como a profundidade da camada de mistura (MLD, em metros) e a velocidade média do vento (m/s). Para cada variável, indicam-se: o número de observações válidas (n), a média, a mediana, o desvio padrão ( $\pm$ ), os valores mínimo e máximo, o 1.º quartil (Q25), o 3.º quartil (Q75) e o número de dados ausentes (NA).

Distância	Parâmetro	n	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Q25	Q75	NA
Próximo	$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\mu\text{M}$ )	12	0.197	0.22	0.149	0	0.449	0.066	0.272	4
	MLD (m)	16	14.875	14	3.222	10	23	13	16.25	0
	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{M}$ )	12	0.855	0.538	0.648	0.215	2.028	0.365	1.259	4
	$\text{O}_2$ dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ )	16	236.178	236.175	5.465	226.16	248.17	233.602	238.847	0
	Salinidade (PSU)	16	36.219	36.225	0.047	36.15	36.3	36.17	36.25	0
	$\text{Si}(\text{OH})_4$ ( $\mu\text{M}$ )	12	0.037	0.016	0.053	0	0.157	0	0.046	4
	Temperatura (°C)	16	18.955	19.01	1.021	17.01	20.46	18.365	19.512	0
	Velocidade do vento (m/s)	16	5.252	5.017	3.548	0.767	12.033	2.125	7.133	0
Afastado	$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\mu\text{M}$ )	10	0.29	0.256	0.134	0.091	0.568	0.226	0.349	5
	MLD (m)	15	19.733	18	6.724	12	38	15.5	23.5	0
	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{M}$ )	10	1.123	1.027	0.576	0.341	1.961	0.656	1.617	5
	$\text{O}_2$ dissolvido ( $\mu\text{mol/kg}$ )	15	240.949	242.02	5.483	233.64	252.23	235.455	244.475	0
	Salinidade (PSU)	15	36.192	36.19	0.058	36.09	36.3	36.155	36.235	0
	$\text{Si}(\text{OH})_4$ ( $\mu\text{M}$ )	10	0.045	0.004	0.083	0	0.242	0	0.028	5
	Temperatura (°C)	15	17.717	17.57	0.683	16.84	19.51	17.285	17.865	0
	Velocidade do vento (m/s)	15	6.151	6.6	2.984	1.933	10.4	3.467	9.017	0



**Tabela C-IV:** Resultados do teste de *Wilcoxon* aplicado aos parâmetros físico-químicos e nutrientes, comparando as estações classificadas como “Próximo” e “Afastado” relativamente à costa ou ponto de referência. Os valores-*p* indicam diferenças estatísticas entre as duas categorias. Foram identificadas diferenças significativas ( $p < 0.05$ ) para a temperatura da água, profundidade da camada de mistura (MLD) e oxigênio dissolvido, sugerindo influência da distância à costa nestes parâmetros ambientais.

<b>Parâmetro</b>	<b><i>p</i>-valor</b>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (μM)	0.176
MLD (m)	<b>0.0169</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)	0.235
O <sub>2</sub> dissolvido (μmol/kg)	<b>0.0267</b>
Salinidade (PSU)	0.148
Si (OH) <sub>4</sub> (μM)	0.703
Temperatura (°C)	<b>0.00125</b>
Velocidade média do vento (m/s)	0.343



## Anexo D

**Tabela D-I:** Resultados do teste de *Dunn* para comparações múltiplas entre ilhas e montes submarinos relativamente à riqueza específica (S). Foram comparadas todas as combinações de pares de regiões amostradas, com base nos valores individuais por estação. Os valores apresentados correspondem ao estatístico *Z*, ao valor de *p* não ajustado e ao valor de *p* ajustado segundo o método de *Holm* para controlo do erro tipo I em múltiplas comparações. Diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0.05$ ) após ajustamento foram identificadas nas comparações entre Flores e Santa Maria e entre Flores e Terceira, indicando menor riqueza específica na ilha das Flores.

Comparação	Z	p-valor não ajustado	p-valor ajustado ( <i>Holm</i> )
Flores - Formigas	-2.6408	0.0083	0.0662
Flores - Pr. Alice	-1.2620	0.2069	1
Formigas - Pr. Alice	1.2559	0.2091	0.8365
Flores - Sta. Maria	-3.0545	0.0023	<b>0.0203</b>
Formigas - Sta. Maria	-0.4136	0.6791	1
Pr. Alice - Sta. Maria	-1.6503	0.0989	0.6921
Flores - Terceira	-3.1166	0.0018	<b>0.0183</b>
Formigas - Terceira	-0.2934	0.7692	1
Pr. Alice - Terceira	-1.6119	0.1070	0.6418
Sta. Maria - Terceira	0.1488	0.8817	0.8817



## Anexo E

**Tabela E-I:** Correlação de *Spearman* entre a biomassa de carbono e a abundância de microfitoplâncton com as variáveis ambientais (temperatura, salinidade, profundidade, distância à costa, oxigênio dissolvido, nutrientes, MLD e velocidade média do vento). São apresentados os coeficientes de correlação ( $r$ ), os respectivos valores de  $p$  ( $p$ -valor), os níveis de significância estatística (\*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ \*\*\*), e a interpretação da força da correlação. A força da correlação foi classificada segundo os critérios de Dancey & Reidy (2007): muito fraca ( $|r| < 0.10$ ), fraca ( $0.10 \leq |r| < 0.30$ ), moderada ( $0.30 \leq |r| < 0.50$ ), forte ( $0.50 \leq |r| < 0.70$ ) e muito forte ( $|r| \geq 0.70$ ).

Variável ambiental	Variável biológica	<i>Spearman r</i>	$p$ -valor	Significância	Interpretação
Temperatura (°C)	Biomassa	0.495	0.0046	**	moderada
Temperatura (°C)	Abundância	0.577	0.0007	***	forte
Salinidade (PSU)	Biomassa	-0.006	0.9733		muito fraca
Salinidade (PSU)	Abundância	-0.079	0.6708		muito fraca
Distância (km)	Biomassa	-0.127	0.4946		fraca
Distância (km)	Abundância	-0.167	0.3706		fraca
O <sub>2</sub> dissolvido (µmol/kg)	Biomassa	0.19	0.3051		fraca
O <sub>2</sub> dissolvido (µmol/kg)	Abundância	0.253	0.17		fraca
Profundidade (m)	Biomassa	-0.367	0.0424	*	moderada
Profundidade (m)	Abundância	-0.397	0.027	*	moderada
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	Biomassa	-0.076	0.6854		muito fraca
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	Abundância	-0.156	0.4033		fraca
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µM)	Biomassa	-0.254	0.168		fraca
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µM)	Abundância	-0.268	0.1454		fraca
Si (OH) <sub>4</sub> (µM)	Biomassa	-0.297	0.1045		fraca

<b>Variável ambiental</b>	<b>Variável biológica</b>	<b>Spearman r</b>	<b>p-valor</b>	<b>Significância</b>	<b>Interpretação</b>
Si (OH) <sub>4</sub> (μM)	Abundância	-0.14	0.4523		fraca
MLD (m)	Biomassa	-0.05	0.788		muito fraca
MLD (m)	Abundância	-0.038	0.8376		muito fraca
Velocidade do vento (m/s)	Biomassa	0.272	0.1387		fraca
Velocidade do vento (m/s)	Abundância	0.242	0.19		fraca

## Anexos F

**Tabela F-I:** Resultados dos modelos de regressão linear simples entre as variáveis ambientais e biológicas e a ordenação geográfica das ilhas/montes submarinos (de oeste para leste). Apresentam-se os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o nível de significância estatística ( $p$ -valor). As variáveis biológicas (biomassa e abundância) foram previamente transformadas com  $\log_{10}(x + 1)$ . Os valores significativos ( $p < 0.05$ ) estão destacados.

Variável	R2	p-valor
Temperatura (°C)	0.064	0.1708
Salinidade (PSU)	0.145	<b>0.0346</b>
O <sub>2</sub> dissolvido (µmol/kg)	0.008	0.6326
Biomassa transformada (µg C L <sup>-1</sup> )	0.355	<b>0.0004</b>
Abundância transformada (cél. L <sup>-1</sup> )	0.345	<b>0.0005</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	0.134	0.0943
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µM)	0.034	0.4127
Si (OH) <sub>4</sub> (µM)	0.079	0.2062
Velocidade do vento (m/s)	0.032	0.3386
Camada de mistura (m)	0.0	0.9782

**Tabela F-II:** Resultados dos modelos de regressão linear simples entre as categorias de distância e as variáveis ambientais e biológicas analisadas. Para cada variável apresentam-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o respectivo valor de significância estatística ( $p$ -valor). As variáveis biomassa e abundância foram previamente transformadas através de logaritmo decimal de base 10, na forma  $\log_{10}(x)$ , com o objetivo de reduzir a assimetria dos dados e aproximar a distribuição à normalidade. Os valores estatisticamente significativos, considerando  $p < 0.05$ , encontram-se destacados.

Variável	R2	p-valor
Temperatura	0.237	<b>0.00546</b>
Salinidade	0.121	0.0547
Oxigênio	0.159	<b>0.0262</b>
Biomassa transformada	0.08	0.123
Abundância transformada	0.041	0.274
$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$	0.051	0.313
$\text{PO}_4$	0.01	0.665
$\text{Si (OH)}_4$	0	0.984
Velocidade do vento	0.001	0.895
MLD	0.032	0.339