



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Giovanna Nascimento D'Aquino Destri

A contribuição das macroalgas para o sequestro de Carbono Azul

Florianópolis
2023

Giovanna Nascimento D'Aquino Destri

A contribuição das macroalgas para o sequestro de Carbono Azul

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Oceanografia.

Orientador: Prof. Paulo Antunes Horta Jr., Dr.
Coorientadora: Marina Nasri Sissini, Dra.

Destri, Giovanna Nascimento D' Aquino

A contribuição das macroalgas para o sequestro de Carbono Azul / Giovanna Nascimento D' Aquino Destri ; orientador, Paulo Antunes Horta, coorientadora, Marina Nasri Sissini, 2023.

42 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Oceanografia Biológica. 3. Carbono Azul. 4. Macroalgas. I. Horta, Paulo Antunes . II. Sissini, Marina Nasri. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Giovanna Nascimento D'Aquino Destri

A contribuição das macroalgas para o sequestro de Carbono Azul

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 30 de Junho de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Paulo Antunes Horta Jr., Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, Dra.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Lidiane Pires Gouvêa, Dra.
Instituição Universidade de Algarve

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Oceanografia.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia

Prof. Paulo Antunes Horta Jr., Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado ao meu avô Samuel (*in memoriam*) por me lembrar constantemente da minha coragem, mesmo ele sendo o maior detentor desse poder.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos às pessoas e entidades que me acompanharam durante estes últimos anos. Iniciar uma pós-graduação uma semana antes da pandemia nos atingir não foi exatamente uma decisão afortunada, mas com a ajuda dos que estão aqui listados, a jornada foi menos complicada.

Quero agradecer ao meu orientador, Prof. Paulo Horta, por sua contribuição científica e apoio pessoal durante os momentos desafiadores e alegres.

Também sou grata à Marina Sissini, minha coorientadora, que me acompanhou desde os meus primeiros passos na academia.

Quero agradecer aos meus colegas e professores do LAFIC por todos os momentos de descontração extremamente necessários para manter a sanidade mental. Em especial, agradeço a Bruna, Luana, William, Cadu, Gabi e Candi.

Aos meus amigos da equipe da Água Viva Mergulho, obrigada por sempre me incentivarem a não desistir e concluir o mestrado e por viabilizar uma das saídas de campo para coletas.

Também não poderia deixar de mencionar o incrível grupo de amigas que fiz no PPG: Amanda, Andressa, Cláudia, Emilli, Fernanda, Lyllyan, Mariana e Tayná.

Às minhas amigas pessoais, que estiveram ao meu lado durante fases boas e não tão boas desta caminhada – Bárbara, Isadora, Juliana, Ilona, Lígia, Vitor e Ju Andrade – meu profundo agradecimento por tudo que fizeram por mim.

Às minhas companhias diárias Carol e André, obrigada por serem meus “duplas” na vida sub e em terra firme.

Agradeço ainda a minha família, que foi minha primeira agência financiadora e meus eternos incentivadores. Sem o apoio de vocês, não teria chego na metade do que cheguei.

Por fim, gostaria de agradecer ao CNPq pela concessão da bolsa para a realização deste trabalho e ao PELD-ILOC por ter sido o projeto que possibilitou meu financiamento e forneceu amostras para compor as análises.

Obrigada também à Universidade de Gotemburgo por conduzir análises de vital importância para este estudo.

RESUMO

Com a necessidade urgente do enfrentamento das mudanças climáticas e crise ambiental, soluções baseadas na natureza tem sido cada vez mais sugeridas. O Carbono Azul, matéria orgânica armazenada por organismos marinhos, é uma alternativa relativamente recente, porém permeada de contradições. Macroalgas marinhas realizam o armazenamento de carbono e possuem grande capacidade de exportação para outros ambientes, no entanto não fazem parte de políticas públicas de proteção relacionadas ao *Blue Carbon*. Neste trabalho foi revisitada a participação do grupo no processo de retenção de carbono e avaliado como condições ambientais, tal qual a distância da costa, pode influenciar na comunidade e em sua capacidade de capturar CO₂. Foi observado que das cinco ilhas amostradas, o gradiente latitudinal teve influência direta no coeficiente de Carbono das amostras, a medida que a distância aumentou, a concentração de C aumentou também. Em relação a comunidade, foi observado o mesmo comportamento dos dados. No entanto, o ponto mais distante, a Ilha de Fernando de Noronha, demonstrou menor riqueza de espécies, algo esperado para ambientes oceânicos. Assim, por serem o maior grupo constituinte dos recifes brasileiros, fechar os olhos para a participação das macrolagas no combate à crise climática e ambiental, é atrasar o êxito nas metas estabelecidas por tratados ambientalistas como a Década do Oceano e o Acordo de Paris.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Algas; Dióxido de Carbono; Ilhas costeiras; Ilhas Oceânicas.

ABSTRACT

With the urgency to face climate change and environmental crisis, nature-based solutions have been increasingly suggested. Blue Carbon, organic matter stored by marine organisms, is a relatively recent alternative, but permeated with contradictions. Marine macroalgae carry out carbon storage and have a great ability to export to other environments, however they are not part of public protection policies related to Blue Carbon. In this work, the participation of macroalgae communities in the carbon storage process was revisited and it was evaluated how environmental conditions, such as the distance from the coast, can influence the community and its power to capture CO₂. It was observed that of the five islands sampled, the latitudinal gradient had a direct influence on the carbon ratio of the samples, as the distance increased, the C concentration also increased. Regarding the community richness, the same behavior of the data was observed. However, the most distant point, Fernando de Noronha Island, showed less species richness, something already expected for oceanic environments. Thus, since they are the largest constituent group of Brazilian reefs, turning a blind eye to the participation of macroalgae in fighting the climate and environmental crisis is delaying the success of the goals established by environmental treaties such as the Ocean Decade and the Paris Agreement.

Keywords: Climate change; Algae; Carbon dioxide; Coastal Islands; Oceanic Islands.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	5
1.1 ALGAS E O CICLO DO CARBONO.....	8
1.2 OBJETIVO GERAL	11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
CAPÍTULO 1	12
2. DISCUSSÃO GERAL E CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS.....	33

1. INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas centenas de anos, mais especificamente após o início da Era Industrial, a concentração de gases de efeito estufa (GEEs), entre eles o gás carbônico (CO₂), tem aumentado e causado mudanças significativas em ambientes e processos naturais. Em 1750 (pré Era Industrial) a concentração deste gás na atmosfera era de aproximadamente 278 ppm, em 2021 esta quantidade passou para 414,7 ppm (FRIEDLINGSTEIN et al., 2022). A contínua emissão de CO₂ por meio da queima de combustíveis fósseis e seu acúmulo na atmosfera prejudicam ecossistemas por todo planeta através do aumento da temperatura (COUMOU & RAHMSTORF, 2012; FRÖLICHER & LAUFKÖTTER, 2018) e suas consequências (aumento do nível do mar, perda de biodiversidade, diminuição do pH e aumento da temperatura da superfície oceânica) já estão sendo observadas (MILLERO, 2007; NELLEMAN et al., 2009; WERNBERG et al., 2012; BERNAL-IBÁÑEZ et al., 2021) e indicam que se as emissões não forem reduzidas até 2025, o ponto de inflexão do planeta será atingido (IPCC, 2022).

Neste contexto, o oceano é afetado de maneiras específicas e sinérgicas. A diminuição do pH da água associada ao aumento da pressão parcial de gás carbônico, o aumento da temperatura e a baixa saturação de carbonato prejudicam diretamente organismos calcificadores marinhos (CAVALCANTI et al., 2018; SCHUBERT et al., 2019). A degradação destes ambientes também está ligada a emissões de gases estufa, cerca de 20-30% das emissões são consequência da devastação de ecossistemas naturais que passam de depósitos, para fontes de GEEs (LE-QUÉRÉ et al., 2009; UNEP, 2009; 2010; SCHUBERT et al., 2019).

A humanidade coopera com a natureza para resolver problemas sociais decorrentes de desastres ambientais e mudanças climáticas há milênios (SEDDON et al., 2020). Porém, nos últimos anos, soluções baseadas na natureza tem ganhado notoriedade (DUARTE et al., 2013; BEAUMONT et al., 2014; BARNES et al., 2021). Soluções baseadas na natureza (do inglês, *nature-based solutions*, NbS) é o termo guarda-chuva para inúmeras ações que aliam soluções de problemas públicos e ambientais na tentativa de promover a mitigação e adaptação às mudanças climáticas (SEDDON et al., 2020). Cultivos de macroalgas, reflorestamento de áreas devastadas e agroecologia, são exemplos de estratégias NbS, entre elas está a política de Carbono Azul.

Implementado em 2009, o termo Carbono Azul ou *Blue Carbon* busca destacar o problema da degradação de ecossistemas marinhos e costeiros. Além disso, salienta sua indispensável conservação e restauração para conter as mudanças climáticas (NELLEMANN et al., 2009). Descrições originais do conceito feitas por dois relatórios principais produzidos por colaborações de agências ambientais (NELLEMANN et al.; LAFFOLEY & GRIMSDITCH, 2009) se referem ao Carbono Azul como toda matéria orgânica capturada por organismos marinhos e como estes ecossistemas poderiam ser gerenciados para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e, assim, contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

Por se tratar de um assunto multidisciplinar, o Carbono Azul permitiu que inúmeras áreas, desde pesquisa de base até campos da economia e política, pudessem colaborar entre si e trabalhar em prol da conservação de ambientes marinhos e costeiros e manutenção de serviços ecossistêmicos. Porém, a popularização do conceito *Blue Carbon* também abriu brecha para confusões e falhas de interpretação sobre seu real significado (LOVELOCK & DUARTE, 2019).

Para ser considerado um ecossistema que efetivamente contribui para a remoção de gases de efeito estufa da atmosfera ("*Blue Carbon Ecosystem*"), é preciso que sejam atendidos alguns parâmetros (Tabela 1). Taxas significativas comprovadas de captura de gases de efeito estufa, capacidade de estocar Carbono por longos períodos, etc são alguns deles (HOWARD et al., 2017; KRAUSE-JENSEN et al., 2018; LOVELOCK & DUARTE, 2019).

Tabela 1: Critérios observados ao considerar ecossistemas para compor políticas de Carbono Azul. Os campos em verde com a palavra "sim" demonstram que há evidências comprovando a adequabilidade daquele ambiente a tal critério, o ponto de interrogação em cinza sinaliza a falta de estudos neste quesito e o avermelhado com "não" indica os casos em que há literatura comprovando que aquele aspecto não ocorre no determinado ecossistema. Na coluna final encontra-se o status de cada um. O quadro amarelo com "***" indica a controversa discussão da inclusão ou não das macroalgas no escopo do Carbono Azul.

Critérios de inclusão para Ecossistemas de Carbono Azul							
Ecossistema	Taxas significativas de remoção ou emissão de gases estufa	Retenção por longos períodos de tempo de CO ₂ capturado	Impactos antrópicos negativos	Manejo prático e possível para manter ou aumentar os estoques e redução de gases estufa	Intervenções que não provoquem impacto social e ambiental	Políticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas	Status
Mangue	sim	sim	sim	sim	?	sim	incluído
Marisma	sim	sim	sim	sim	?	sim	incluído
Gramas Marinhas	sim	sim	sim	sim	sim	sim	incluído
Salinas	?	?	sim	?	?	?	incluído
Mata ciliar de água doce	?	sim	sim	sim	?	?	incluído
Macroalgas	sim	?	sim	sim	?	sim	**
Fitoplâncton	sim	?	?	?	?	não	não incluído
Recifes de coral	não	não	sim	não	?	sim	não incluído
Fauna marinha (peixes)	não	não	sim	não	?	não	não incluído
Colônias de ostras	não	?	sim	não	sim	sim	não incluído
Planície de lama	?	?	sim	?	sim	sim	não incluído

Fonte: adaptado de Lovelock e Duarte (2019)

Ecossistemas costeiros como mangues, bancos de gramas marinhas e marismas são reconhecidos como *Blue Carbon* (BC) por possuírem literatura comprovando sua compatibilidade com os parâmetros necessários. Até o momento, demais sistemas marinhos contemplam certos critérios para inclusão no escopo do Carbono Azul (peixes, bivalves e recifes de coral) (LOVELOCK & DUARTE, 2019), porém possuem lacunas em outros aspectos, entre eles estão aqueles dominados por macroalgas (GOUVÊA et al., 2020).

As macroalgas são os organismos majoritários na composição da comunidade bentônica do Atlântico Sul, incluindo ilhas costeiras e oceânicas (AUED et al., 2018). Assim, é relevante que haja compreensão do seu papel como reservatórios de carbono atmosférico. A importância das macroalgas no sequestro de Carbono é inegável (Figura 1) (HILL et al., 2015; KRAUSE-JENSEN & DUARTE, 2016; GOUVÊA et al., 2020). Porém, há resistência de parte da comunidade científica em aceitá-las como BC. Um dos argumentos é que por se tratar de um grupo polifilético (4 Filos e cerca de 60 Ordens) com enorme variedade morfológica e fisiológica, compromete-se a padronização da taxa de captura e armazenamento de carbono (KRAUSE-JENSEN et al., 2018). Seu papel no sequestro e armazenamento do carbono ocorre em uma

área diferente do seu habitat, sendo consideradas excelentes doadoras de carbono (DUARTE et al., 2013; BARRÓN & DUARTE, 2015; KRAUSE-JENSEN & DUARTE, 2016). Macroalgas assimilam o C, mas seu aprisionamento e depósito é realizado em outros sistemas (manguezais, marismas e bancos de gramas marinhas) sendo visto até que metade do carbono em sedimentos de ecossistemas costeiros é proveniente de outros organismos fotossintetizantes, incluindo as macroalgas (KENNEDY et al., 2010). Outro destino documentado do carbono proveniente das macroalgas é o oceano profundo e afastado da costa. Grupos de algas que possuem substâncias como carragenanas e fucoidans foram amostrados em profundidades de 4.000 m e cerca de 5.000 km de distância da costa (ORTEGA et al., 2019).

1.1 ALGAS E O CICLO DO CARBONO

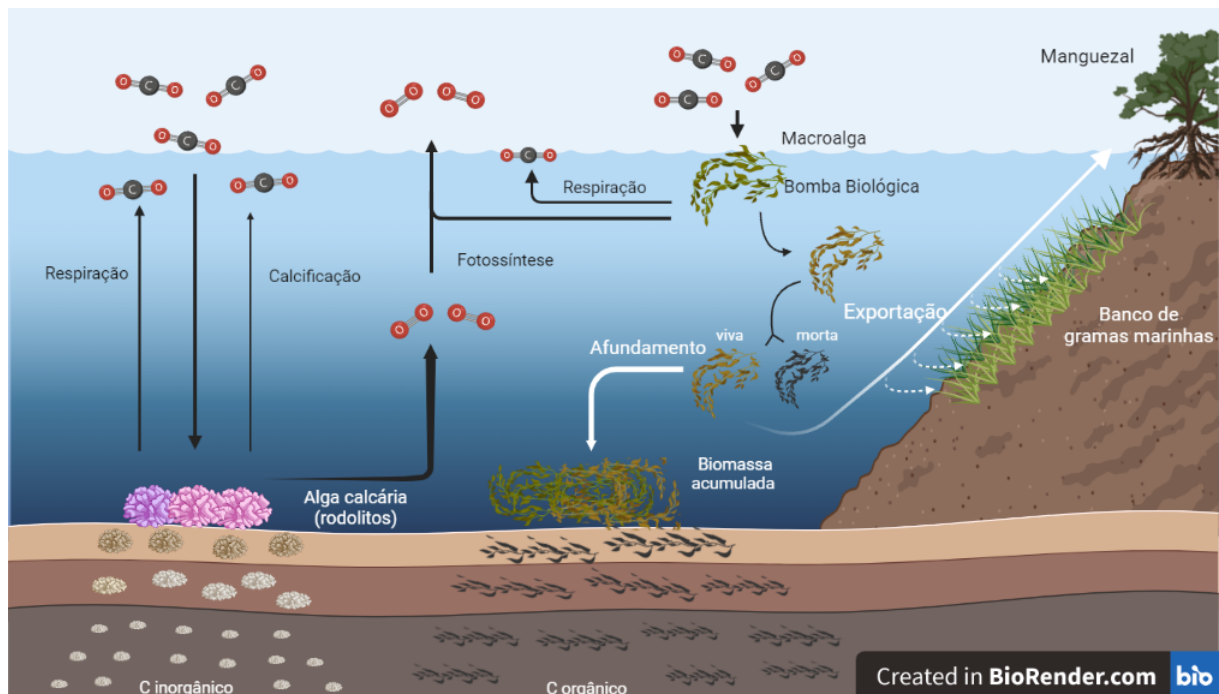
A relação das algas com o ciclo do Carbono é centrada na atividade da Bomba Biológica, que transporta uma parte dos compostos orgânicos de organismos vivos para os sedimentos, onde podem permanecer por centenas de milhares de anos ou mais. Quando se trata especificamente de algas, existem dois pontos principais: a capacidade de produzir compostos refratários e gerar extensos depósitos de sedimentos carbonáticos (Figura 1).

O carbono refratário é uma forma orgânica menos disponível à atividade microbiana. A estrutura algal, muitas vezes da parede celular ou da bainha de mucilagem, as torna resistentes à quebra química. Indivíduos dos grupos Rhodophytas e Ocrophytas são conhecidos por apresentarem carragenanas e fucoidanos, estruturas complexas que promovem a recalcitrância e evitam a dessecação. Essa característica físico-estrutural das algas possibilita que a matéria orgânica afunde antes mesmo de ser degradada, sequestrando o carbono no sedimento protegido da ação microbiana em ambiente anóxico.

A calcificação, produção e acumulação de carbonatos na estrutura é sugerida como sendo uma estratégia de sobrevivência de espécies mais antigas (+2,2 bi de anos atrás), quando a atmosfera acumulava maior quantidade de dióxido de carbono. Organismos mais recentes se aproveitariam do CO₂ liberado na reação de calcificação para sua própria fotossíntese. Com a atuação da enzima RuBisCo, é possível fixar o Carbono, transformando-o em compostos reduzidos e favorecendo a atividade fotossintética. No entanto, essa enzima possui tanto ação carboxilase (em situações

em que a quantidade de CO_2 é maior que O_2), quanto oxidase (quando há mais oxigênio disponível do que gás carbônico). No segundo caso, ocorre a redução da fotossíntese e favorecimento da respiração, pois um dos produtos da reação (fosfoglicolato - $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_6\text{P}^{-3}$) é liberado da célula, gerando perda de carbono orgânico. Dada a diversidade taxonômica das algas, a variedade da função da RuBisCo também é observada. Características como especificidade (seletividade para CO_2 ou O_2) e K_{cat} (taxa de catálise quando o substrato é saturado) tornam grupos de algas mais eficientes na captura de carbono que outros. Por exemplo, a RuBisCo de Rhodophytas possui alta especificidade para CO_2 , tornando-as seletivas ao gás carbônico.

Figura 2 – Ilustração das macroalgas e o Ciclo do Carbono



Contribuição das macroalgas no ciclo do Carbono. Tanto pela via de produção de compostos refratários que afundam e são aprisionados no sedimento no fundo, aqui representado por alga flutuante (kelp ou *Sargassum*), quanto por depósito de sedimento carbonático representado por algas calcárias. Criado no BioRender.com.

O sequestro de carbono através da atividade fotossintética de organismos marinhos ainda é pouco explorado, já que não existem dados de medições precisas do armazenamento de carbono (LE QUÉRÉ et al., 2009; KRAUSE-JENSEN et al., 2018) especialmente por macroalgas no contexto brasileiro. Devido aos ambientes recifais do Brasil estarem sob ameaça das mudanças climáticas e consequências da urbanização, dimensionar o Carbono Azul do país é de grande relevância. Estimar a capacidade de captação e sequestro de carbono de ilhas costeiras e oceânicas fornece subsídio para implementação e manutenção de medidas de proteção

ambiental destes locais. Enquanto mensurar este processo em ilhas costeiras pode mostrar os efeitos da ocupação urbana na área de maior concentração populacional (HORTA et al., 2020), avaliar a captação de carbono por macroalgas em contexto oceânico pode oferecer uma visão da influência da profundidade na assimilação e depósito orgânico.

No âmbito dos Objetivos para um Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pelas Nações Unidas, destaca-se o Objetivo 14: Vida na Água. Em 2021, foi instituída a Década da Ciência Oceânica, que tem como objetivo principal o oceano, com sete resultados esperados: um oceano limpo, saudável e resiliente, previsível, seguro, produtivo e explorado de forma sustentável, transparente e acessível, e conhecido e valorizado por todos. Quando nos concentramos em compreender o potencial do Carbono Azul nos ambientes marinhos brasileiros, praticamente todas as metas da Década são contempladas. A compreensão da magnitude deste serviço ecossistêmico permite não só a preservação e restauração dos sistemas naturais, mas também o benefício das comunidades costeiras tradicionais, que dependem da manutenção de suas fontes de renda e qualidade de vida, assim como a criação de novas Unidades de Conservação e proteção das UCs já existentes. No país, há cerca de 190 unidades de conservação marinhas incluindo tanto ambientes marinho costeiros, quanto ilhas oceânicas com distintos níveis de proteção.

Mesmo sendo consideradas ambientes quase intocados, a biodiversidade de ilhas oceânicas está mais suscetível aos efeitos das mudanças climáticas. Isto se dá por estarem geograficamente isoladas e apresentarem altas taxas de endemismo e baixa redundância funcional. Contudo, estas características conferem às ilhas oceânicas grande importância para estudos de biodiversidade e evolução (FERREIRA; HACHICH; PINHEIRO; QUIMBAYO; LUIZ; MENDES, 2020). No entanto, ilhas costeiras também enfrentam ameaças à biodiversidade por estarem sob constante efeito da urbanização por justamente estarem próximas de descarga de nutrientes, e assim, correndo o risco de terem seus habitats prejudicados pela eutrofização e favorecendo o aparecimento e proliferação de espécies oportunistas (KRAUSE-JENSEN et al., 2018; DE VASCONCELOS et al., 2019).

Neste trabalho é apresentado o conteúdo orgânico de comunidade de macroalgas de ilhas do Atlântico Sul e discutido como a distância em relação à costa pode ser um fator de influência na capacidade destes organismos de armazenar carbono, bem como no auxílio na mitigação das mudanças climáticas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Mensurar o teor de carbono das principais espécies de macroalgas da comunidade bentônica de cinco ilhas do Atlântico Sul e discutir como fatores ambientais podem influenciar no sequestro de carbono atmosférico destes organismos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender como o gradiente latitudinal afeta condições ambientais e o armazenamento de Carbono pelas espécies de macroalgas analisadas;
- Avaliar como diferentes cenários ambientais oferecem condições para as comunidades algais desempenharem serviços ecossistêmicos de captura de carbono, sob a perspectiva do Carbono Azul e da manutenção da biodiversidade.

1.4 HIPÓTESES

- Será observada uma separação de províncias biogeográficas como proposto por Spalding et al. (2007) de acordo com as diferentes variáveis ambientais analisadas em decorrência do gradiente latitudinal.
- Em relação à distância da costa, espera-se que com o incremento da distância haja aumento do número de espécies das comunidades. Diferenças significativas na abundância e coeficiente Carbono:Nitrogênio entre os pontos amostrados também são previstos.
- Em comunidades com maior riqueza de espécies, é esperado que a relação C:N também seja maior.

CAPÍTULO 1

(submetido à *Science of the Total Environment*, formatado seguindo os padrões do periódico)

Main environmental drivers of macroalgal carbon storage - the distance from coast influences

Giovanna Destri ^{a *}, Marina Nasri Sissini ^b, Calos Eduardo Peixoto Dias ^b, Paulo Antunes Horta ^{a, b}

^a Oceanography Department, Math and Physical Sciences Center, Federal University of Santa Catarina, Trindade, Florianopolis, Santa Catarina, Brazil

^b Phycology Laboratory, Department of Botany, Biological Sciences Center, Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, Santa Catarina, Brazil

* Corresponding author (email address: giovannaddestri@gmail.com – G. Destri)

Graphical Abstract

[attached]

Abstract

Nature-based solutions such as Blue Carbon policy are in the spotlight recently to find a solution for the increasing global temperature. Macroalgae are great organic carbon donors and sinks, although the inclusion of this group in BC remains controversial. Here we evaluated southwestern Atlantic Ocean islands under different latitudinal gradients to discuss the macroalgae carbon storage and the influence of environmental predictors on the abundance, carbon, nitrogen concentrations, as well as CN ratio. The main drivers responsible for biomass and CN ratio was nitrate, phosphate, dissolved oxygen, chlorophyll, and salinity. Our results showed that the increasing distance from the coast improved CN ratio, although abundance declined, possibly due to herbivory or seasonal effect. Species richness were directly related with the distance as well; however, a decline

was detected on the furthest site (Fernando de Noronha), what is expected for oceanic islands. Coastal and oceanic management policies focusing on macroalgae as truly characters on system's maintenance and ecosystems services providers enhance the chance on achieving of environmental goals and a better perspective on the solving of climate and environmental crisis.

Keywords

Carbon deposit; Macroalgae; Above Ground Biomass; Oceanic Island; Coastal Island.

1. Introduction

The continuous emission of Carbon dioxide (CO₂) through burning of fossil fuels and its accumulation in the atmosphere harms ecosystems all over the planet and calls for an urgent solution to mitigate and minimize climate change (IPCC, 2022). Nature-based solutions (NbS) have been increasingly considered to mitigate the damage caused by the indiscriminate emission of CO₂ (Duarte et al., 2013; Beaumont et al., 2014; Barnes et al., 2020; Seddon et al., 2020). Nevertheless, marine species have a big potential to collaborate with carbon sequestration, this strategy is called the Blue Carbon Policy (Laffoley and Grimsditch; Nellemann et al., 2009). This approach emerged to highlight the problem of degradation of marine and coastal ecosystems, in addition to emphasizing its indispensable conservation and restoration, to contain climate change, and maintain its ecosystem services (Laffoley and Grimsditch; Nellemann et al., 2009).

Coastal ecosystems such as seagrass beds, mangroves, and salt marshes have been extensively studied for their Organic Carbon stocks in sediments, the Blue Carbon (BC). However, Kennedy and collaborators (2010) showed that half of the carbon stored in sediments in these ecosystems is allochthonous, meaning it originates from another environment, including macroalgae. In 2019, a study revealed that algae biomass has the potential to travel long distances of up to 5,000 km from the coast and sink to significant

depths deeper than 4,000 m (Ortega et al., 2019). Furthermore, the study found that a substantial portion of the DNA from floating algae, approximately 69%, can reach depths of at least 1,000 m, indicating the important role of algae in Carbon sequestration in habitats different from their own (Ortega et al., 2019). Despite these findings, current estimates of organic carbon stocks conservatively exclude allochthonous carbon (Krause-Jensen et al., 2018).

To be considered a BC ecosystem, it is necessary to meet some criteria like accurate measures of GHG removal and emission, long-term carbon sink, among others (see Table 1 in Lovelock & Duarte, 2019). Although the term Blue Carbon was coined in the late 2000s, the ability of macroalgae to capture atmospheric CO₂ had already been documented since the 1980s (Smith, 1981), moreover the group is well known for being carbon donors to other ecosystems (Barrón & Duarte, 2015; Duarte et al., 2013; Hill et al., 2015; Krause-Jensen & Duarte, 2016), but even so, they still are not included in BC frameworks.

Some argue that macroalgae should not be considered for BC Policies due to the short lifespan of species such as kelp, which are quickly consumed by other organisms, disqualifying them as potential long-term carbon sinks. This argument suggests that Laminariales, a group in the same class as Sargassum, is not part of a viable climate mitigation strategy (Howard et al., 2017). However, Laminariales, as other macroalgae groups, have refractory components such as fucoidan, which reduce the availability of carbon contained in the algal structure. In fact, half of the fixed carbon from brown algae is in the form of fucoidan, a refractory and microbial compound (Buck-Wiese et al., 2022). Part of this carbon has as destiny the deep ocean, where 24 seaweed order were identified with abundant DNA material (Ortega et al., 2019).

The presence of refractory compounds varies between groups, Rhodophyta produce carrageenan, a sulfated polysaccharide that functions similarly to fucoidan. Within this phylum, calcareous algae immobilize carbon in an inorganic form by accumulating carbonates as a mineral (calcite) in their cell walls. The calcification process can be considered a minor source of carbon dioxide, as 0.6 mol of CO₂ is released for each mol of CaCO₃ synthesized (Ware et al., 1992). However, a study already showed that coralline algae global carbon sink rates are similar to mangroves and salt marshes, stocking over 1.6 x 10⁹ tons of Carbon per year (van der Heijden & Kamenos, 2015). Unsolved questions about the internal reuse of CO₂ released in the process of calcification by cellular respiration have not been completely elucidated. But the balance of the process respiration/calcification shows that there is a positive balance in the removal of carbon dioxide by calcareous algae, which can be immobilized for thousands of years. Moreover, algae are known to be one of the first eucaryotic lifeforms, performing photosynthesis since Proterozoic eon. Therefore, the actual long-term carbon sequestration is well played by the group.

Since the Chinese giant green tide event of 2008, by that moment considered the world's largest macroalgal bloom (Liu et al. 2009), these organisms are attracting more attention regarding their environmental role and responses related with continental runoff. The increased frequency and intensity of these events, inclusive in the Atlantic ocean where the Sargassum golden tide assumed oceanic dimensions in the last decade (Smetacek and Zingone 2013, Wang et al. 2019), where definitive to bring macroalgae to the first page of this discussion regarding the carbon fate in marine environments. If in one hand macroalgae can photosynthetically immobilized huge amounts of CO₂ in their biomass, on the other hand the abundance of these organisms in coastal regions are threatened by climate change, coastal pollution and overfishing with losses that reach 90% of canopy

(Schermer et al., 2012; Gorman et al., 2020). Environmental factors as irradiance at the bottom, salinity, maximum and minimum Temperatures have been frequently related with seaweed distribution, while minimum Temperature and Nitrate were used to explain their higher abundances (Gouvêa et al., 2020). However, under extreme conditions, with higher temperatures and nutrient concentration these species presented growth rate compromised with important reduction in the relation C/N stored (Gouvêa et al., 2023). Therefore we can hypothesize that intermediary temperatures associated with mesotrophic condition, scenario observed in coastal islands, will influence positively the macroalgae abundance and the relation carbon/nitrogen stored in their assemblages regarding a distance gradient from coast, reinforcing their potential to play key role on Carbon balance.

Besides the amount of carbon, this discussion should also consider how different macroalgae species behave themselves, once in different scenarios benthic community diversity also has ecological importance to the trophic stability and ecosystemic resilience regarding local and global stressors. Pondering all these aspects, balancing different environmental conditions, we can evaluate the function macroalgae as carbon repositories supporting the change a rediscussion of their status in the Blue Carbon Policies. Southwestern Atlantic benthic communities represent an excellent scenario for the evaluation of these possible variations, since they are dominated by algae (turf and frondose) (Aued et al., 2018; Horta et al., 2022). Therefore, it is imperative that we strive to understand the role of this group in carbon balance and eventual capacity of help on climate and environmental planetary crises (Bañolas et al., 2020; Gouvêa et al., 2020; Hill et al., 2015).

Here, we discuss the difference between macroalgal above ground carbon stocks of five sites in the Southwestern Atlantic ocean by quantifying it and comparing islands with different latitudinal gradients.

2. Materials and Methods

Samples were collected during July-October 2021 on five sites in the southwestern Atlantic ocean: (1) Ilha do Arvoredo (ARV, 27°17'01.2"S 48°22'30.6"W), (2) Ilha do Francês (FRA, 27°24'57"S 48°28'39"W), (3) Ilha dos Guarazes (GUA, 27°33'06"S 48°33'04"W), (4) Ilha de Fernando de Noronha (NOR, 3°48'41.2"S 32°23'36.7"W), and (5) Ilha do Ratoes Pequeno (RAT, 27°29'42"S 48°34'03"W). The collection was conducted in the shallow infralittoral, within a depth range of 0.1-5m, with twenty-meter transects extended, and every 2m, a 25cm x 25cm square was scraped off using a spatula. The resulting fragments were frozen, labeled with site, depth, and sampling date, and placed in plastic bags before being transported to the Phycology Laboratory at Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianopolis (Brazil).

Upon arrival, all samples were thawed to room temperature and sorted. Abundant organisms were identified using a microscope and a stereomicroscope, with efforts made to identify them to the lowest possible taxonomic level. Each identified organism was weighed to obtain the humid weight (HW). Subsequently, the samples were dried for 48-72 hours in a muffle furnace at 40°C, and the resulting dry weight (DW) was determined using an analytical balance. The protocol was adapted from Gouvêa et al. (2020).

2.1 Total Organic Carbon and Nitrogen analysis

To determine the concentrations of Total Carbon (TC) and Nitrogen (TN), dried samples were grounded into a homogenous powder using a pestle and mortar. Subsamples of 5 µg were weighted, packed in tin capsules, and transported to the University of Gothenburg (Sweden) to determine the concentrations of Total Carbon (TC) and Nitrogen (TN), and

their respectively $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ratios. Samples were analyzed using an Elemental Analyzer coupled to an isotope ratio mass spectrometer (EA-IRMS, Sercon Ltd., UK). Uncertainties of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were lower than 0.3%.

2.2 Environmental variables

Environmental data were obtained from BioOracle (www.bio-oracle.org, Tyberghein et al., 2012; Assis et al., 2018), and seven environmental variables were considered as potential predictors of Carbon concentration: Benthic Maximum Temperature, Benthic Maximum Salinity, Benthic Maximum Nitrate, Benthic Maximum Phosphate, Benthic Maximum Dissolved Oxygen, Benthic Maximum Iron, and Benthic Maximum Chlorophyll.

2.3. Statistical evaluation

The primary analyses were performed using PRIMER 7.0.21 software (Clarke and Gorley, 2015). We aimed to examine the correlations between environmental variables and biological information (biomass, Carbon concentration, Nitrogen concentration, and C/N coefficient). To improve the normality of the environmental data, we applied a square root transformation. For biological data, we used the $\log(x+1)$ transformation. Subsequently, we generated a similarity matrix for environmental data using the Euclidean distance method. For the biological information, we used the Bray-Curtis index.

A PERMANOVA analysis was conducted using the distance from the continent as a factor for each biotic dataset in relation to the environmental data, and 999 permutations were performed. Following the PERMANOVA, we utilized Distance based linear models (DistLM) approach to create spatially informative graphs to better illustrate the distribution of sites according to environmental predictors.

After analysing the environmental variables, we used RStudio v 4.2.3 (RStudio team, 2020) to observe the distribution of the biomass and C:N coefficient datasets from the sampled islands. First, to verify whether the data met the assumptions of the model, the

Shapiro-Wilk and Breusch-pagan tests were used. The tests were performed to verify the normality and homoscedasticity of the residuals in addition to graphs plotting the residuals vs adjusted as suggested by Zuur et al. (2010). Subsequently, a Posthoc Tuckey test with a significance level of 5% (95% of reliability) was performed to compare the means of the groups.

3. Results

We analyzed a total of 14 species of macroalgae and turf, comprising 7 Rhodophyta (“red algae”) and 7 Ochrophyta (“brown algae”). The influence of the relative distance from the continent on the values of biological data of each site was observed with an increasing on the species richness as the distance from the coast increased, until a decrease in oceanic island habitat, as expected (Figure 1). Here we can notice that significant differences were detected between the sites: Guarazes, the closest island, was distinct from all locations with the lowest richness. On the other hand, Ilha do Arvoredo, with the highest sp richness was also different from all the other sites. Ilha do Ratones and Francês were relatively alike to Arvoredo, but still had some difference degree. Fernando de Noronha, the furthest site, had a slightly similarity with Francês.

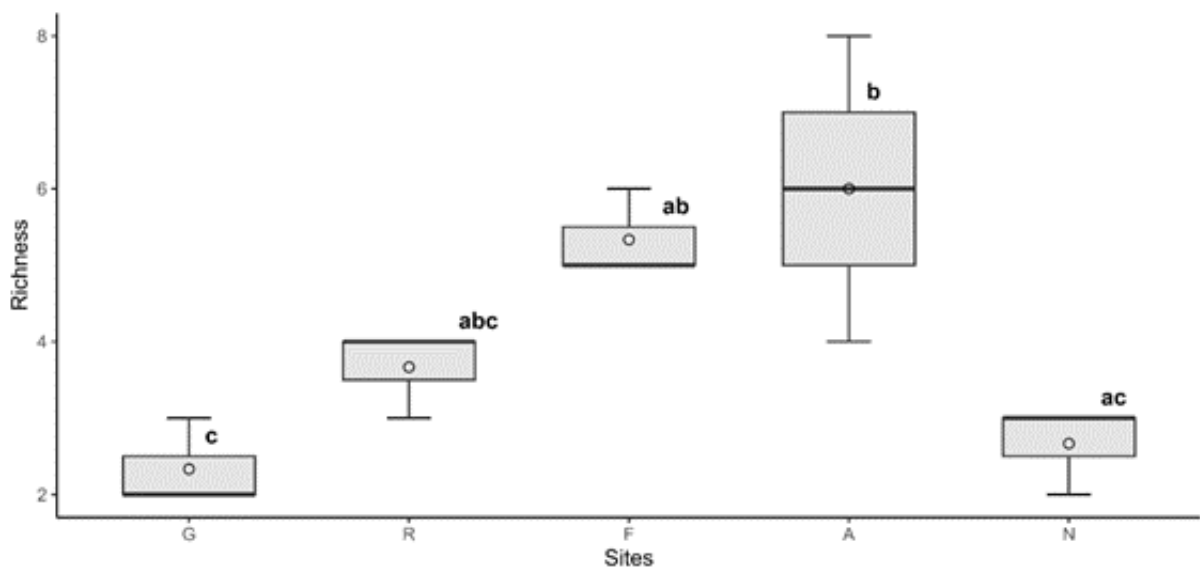


Figure 1: Boxplot graph representing the minimum and maximum values and the average of each group for the variable species richness of the sites. Ilha dos Guarazes (G), Ilha do Ratonés Pequeno (R), Ilha do Francês (F), Ilha do Arvoredo (A), and Ilha de Fernando de Noronha (N). The sequence of locations is in order from closest to furthest from the continent. Letters a, b, c represent statistical differences between data means according to Tuckey test.

When considering abundance, the distance from the coast revealed a significant difference between the sampled islands (Figure 2). We observed that all sites were significantly different from each other but the two closest locations, Guarazes and Ratonés, showed a gathering behavior. In fact, the samples from these two sites exhibited more similarities with each other than with data from the other islands, as evidenced by the clustering across all PERMANOVA analyses. The similarity data based on the Bray-Curtis index showed that Ratonés Pequeno and Guarazes have 58% similarity in terms of biomass, maybe due to the small distance between them (6 km). Fernando de Noronha was the island with the highest levels of difference observed between all sites in relation to biomass. The oceanic island was the most different spot being only 26% like Ilha do Francês and having no degree of similarity with any other location. Among the environmental predictors, that best explains biomass data distribution were Nitrate, Phosphate, Dissolved Oxygen and Chlorophyll, with 83% of explanation power.

When analyzing the total Carbon concentration, the pattern of relationship between Ratonés and Guarazes samples was confirmed (Figure 2). However, when compared to other sites, the difference was significant, especially these two islands (G and R) with Ilha do Francês (F). In the similarity between groups, the percentage of similarity of Noronha and Francês was 33%, and this was the only site with any level of correspondence with the oceanic island. Arvoredo was different from all the sites, with only 34% of similarity with Guarazes island. The environmental variables with most influence on the Carbon data were Temperature, Salinity, and Iron with 85% of accuracy.

Regarding the Nitrogen concentration, Guarazes and Ratonés show a close distribution with 74% of similarity. The first site (GUA) compared to Francês island has the higher significance level of difference ($p=0.002$). Noronha, the most geographically distant point from the coast (306.5 km), showed only 28% similarity to Ilha do Francês, and again with no similarity to the other sampled site, presenting very distinct data groups (Figure 2). As well as biomass data, the environmental predictors that better described ($R^2 = 83\%$) the distribution of Nitrogen measures were Nitrate, Phosphate, Dissolved Oxygen and Chlorophyll.

With the C:N ratio data we saw significant differences between all sampling points, with Ratonés and Guarazes 73% similar to each other (Table 4 on Supplementary material), and a clear separation between the other sites (Figure 2). Francês and Ratonés had the second higher similarity rate (47%). Fernando de Noronha site had only 26% of Carbon/Nitrogen factor similarity with Ilha do Francês, no other site showed similarity with the oceanic island. The environmental data that better explain C/N distribution were Salinity, Nitrate, Phosphate, Dissolved Oxygen, and Chlorophyll. These five factors explain 84% of data arrangement (Table 4 on Supplementary material).

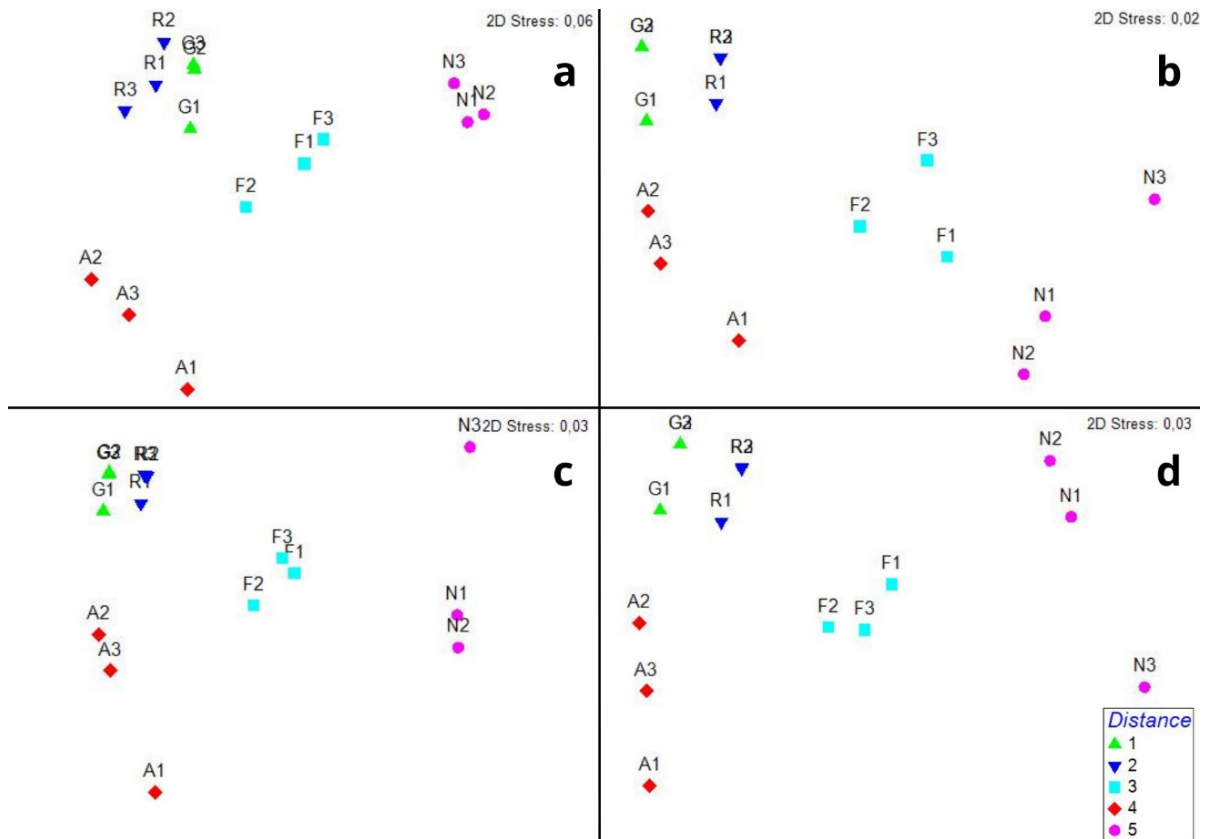


Figure 2: Multidimensional scaling (MDS) of sites distribution relating (a) biomass, (b) total carbon concentration, (c) total nitrogen concentration and (d) C:N ratio with environmental data and distance degree in ascending order. The letters represent the sites Ilha dos Guarazes (G), Ilha do Ratonos Pequeno (R), Ilha do Francês (F), Ilha do Arvoredo (A), and Ilha de Fernando de Noronha (N). The numbers represent sample replica.

Regarding the ANOVA and post-hoc analysis, the results were different than the initial tests. When Shapiro-Wilk was conducted, only biomass and C:N ratio data showed statistical relevance between the islands, revealing a grouping of sites: (a) ARV, (ab) FRA, (b) NOR and GUA, and (c) RAT (Figure 3, a).

Table 1 | Result of One-Way ANOVAs for the variables Richness, Biomass (g), Carbon($\mu\text{g/g}$), Nitrogen ($\mu\text{g/g}$) and Carbon/Nitrogen ($\mu\text{g/g}$).

Anova One-Way					
Variables	Factor	df	MS	F	P
Richness	Sites	4	7.833	7.344	0.0050
	Error	10	1.067		
Biomass (g)	Sites	4	107.43	21.63	0.0001
	Error	10	4.97		
Carbon $\mu\text{g/g}$	Sites	4	2433507	0.425	0.7880
	Error	10	5727264		
Nitrogen $\mu\text{g/g}$	Sites	4	67120	2.677	0.0941
	Error	10	25069		
Carbon/Nitrogen ($\mu\text{g/g}$)	Sites	4	1239	11.47	0.0009
	Error	10	1080		

Values in bold represent significant differences ($P < 0.05$).

Observing the Carbon/Nitrogen ratio data, another pattern becomes apparent. The island closest to the continent, Guarazes, is now separated from the others (a), while Ratonés (ab), the second closest, is similar to both Guarazes and Francês (bc) and Noronha (bc). These two islands (F and N) exhibit partial similarity to Arvoredo (c), which has a unique cluster (Figure 3, b).

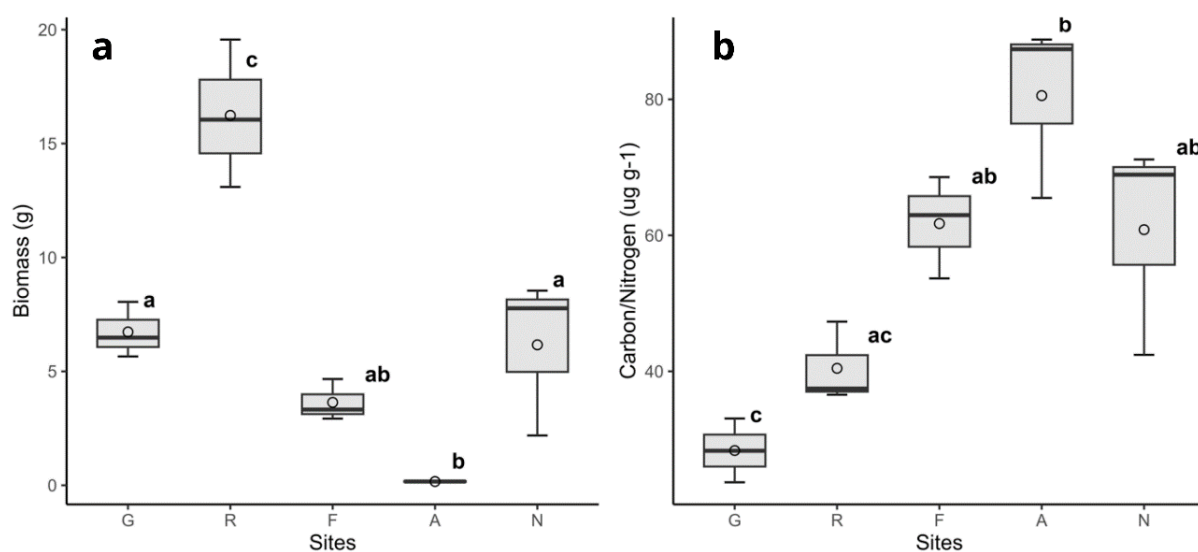


Figure 3: Boxplots representing the relationship between biomass and the islands on the left side (a), and the Carbon/Nitrogen ratio according to the location on the right side (b). The islands are organized in crescent order by distance: Guarazes (G), Ratoles (R), Francês (F), Arvoredo (A), and Fernando de Noronha (N). Letters a, b, c represent statistical differences between data means according to Tuckey test.

4. Discussion

Herein we demonstrate that the nutrient, irradiance and temperature, factors that presented gradients related with the distance from coast, were main physicochemical drivers of the Carbon/Nitrogen concentrations, as well as abundance and composition of the dominant macroalgae species of Brazilian coastal region. The C:N ratio increased with the distance from the coast, revealing relation of higher concentrations of refractory carbons (Ortega et al., 2019; Buck-Wiese et al., 2022) with higher irradiances combined with reduced nutrient availability, as nitrate (Gouvêa et al., 2023). However, higher C:N relation was observed in assemblages with lower abundances, and higher species richness (Xu et al., 2020) adding important elements to balance the discussion about the role of macroalgae in the framework of blue carbon donors (Lautenbach et al. 2017; Ortega et al., 2019; Osuri et al., 2020; Rahman, 2021).

Biomass and total nitrogen concentration data had the same cluster of environmental predictions with better response: Nitrate, Phosphate, Dissolved Oxygen and Chlorophyll.

Among main constituent of coastal benthic communities, *Sargassum* presented the biomass variability 20% influenced by Nitrate concentration (Gouvêa et al., 2020). Previously dominant individuals from communities with a lower degree of urbanization, when exposed to eutrophic environments, suffer a reduction in their photosynthetic capacity and can be replaced by species of the genera *Chondracanthus*, *Gracilaria* and *Ulva* (de Vasconcelos et al., 2019). These groups are known for having high growth rates, short life cycles and tolerance to high nutrient concentration, being bioindicators of poor environmental conditions (Portugal et al., 2016). Over 70% of the samples of the present work had the presence of *Sargassum*. *Chondracanthus* was collected in our analyses, however, in only one point and with significantly lower biomass than *Sargassum* (Table 5, supplementary material). Species with carbon accumulation mechanisms such as refractory compounds like carrageenan in *Sargassum*, tend to express biomass growth also under conditions of increased CO₂ (van der Loos et al., 2019).

As Ratones and Guarazes Islands are in a bay territory, the circulation of nutrients (dissolved or particulate) becomes limited and accumulate in sediments (Cruzado et al., 2002), however, RAT is the site with the highest abundance. Christine-Oleza and collaborators (2017) showed by culture experiments results that the nutrient's circulation is more important to maintain the systems rather than their concentration. The high abundance in Ratones, mainly of *Sargassum vulgare* and *Dasya* sp. can be explained by the high rate of nitrogen in the water (Gouvêa et al., 2020), although in the present work the available form of this nutrient was not measured. The low biomass observed in Ilha do Arvoredo can be explained by the herbivory pressure present on the island system (Schermer et al., 2012) or by the seasonality (Horta et al., 2009), since the collections were carried out in winter. However, the species richness of this site is superior to all other locations sampled (Figure 1), raising the discussion of the importance

of preserve species diversity to maintain an efficient carbon storage and support climate change and planetary crisis management. In a recent study, Lanari *et al.* (2022) investigated temporal dynamics in the phycoflora of Ilha do Arvoredo and conclude that it was not possible to correlate functional redundancy with environmental stability. That means that even if more than one species performs a similar function to another in the environment, this is not enough to overcome the effect of environmental changes on ecological functions (Lanari et al., 2022).

Regarding the latitudinal temperature gradient, as well scenarios related with ocean warming, further evaluations should consider this factor, as pointed out by Gouvêa et al. (2023). In this study, Gouvêa et al. (2023) showed that a tropical *Sargassum* species manifested adjustments under raised temperature in contrast to more temperate populations. The biogeographical provinces proposed by Spalding and collaborators (2007) support the differences between tropical and temperate communities, and in the present study we saw that the distance gradient affected communities' composition and species physiological functions such as carbon assimilation. In attempt to unite efforts against climate change, assess how different populations respond ecophysiologically to environmental factors offers an overview of how ecosystems services such as atmospheric carbon sequestration will be carried out in the next years.

Moreover, our findings contribute to coastal and oceanic management policies focusing on macroalgae as truly characters on system's maintenance and ecosystems services.

5. Conclusions

After observing how the distance from the mainland influenced the environmental conditions and, consequently the capacity of the macroalgae community in store atmospheric carbon, we suggest that the group should be strongly considered on global and local Blue Carbon policies for protection and biodiversity maintenance. Considering

the participation of algae on Brazilian reefs composition, turning a blind eye to their role in climate change mitigation is wasting the chance to achieve carbon neutrality goals established by governments and limit the action of strategies nature-based approaches to maintaining the biodiversity and ecosystem services of coastal and oceanic marine habitats.

On next efforts, dedicating to investigate the carbon stocks of more marine environments in the Blue Amazon can stimulate the inclusion of these habitats in environmental policies, but always paying attention to the species diversity and the healthy community's structure.

Acknowledgements

This work was supported financially by National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) through the granting of a grant for the Project for the Long-Term Monitoring of Oceanic Islands (PELD - ILOC).

The sampling of the present work was made possible by Água Viva Mergulho (PADI Dive Center), Florianopolis, BR, ECO sailboat (Veleiro ECO – UFSC) and PELD – ILOC.

The Elementary Analysis were performed by Alex Cabral dos Santos at Department of Marine Sciences at University of Gothenburg, Gothenburg, SE.

References

1. [dataset] Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrão, E.A., De Clerck, O., 2017. Bio-ORACLE v2.0: extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 27, 277–284. <https://doi.org/10.1111/geb.12693>
2. Aued A.W., Smith F., Quimbayo J.P., Cândido D.V., Longo G.O., Ferreira C.E.L., *et al.*, 2018. Large-scale patterns of benthic marine communities in the Brazilian Province. *PLoS ONE*. 13(6), e0198452. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198452>
3. Bañolas, G., Fernández, S., Espino, F., Haroun, R., Tuya, F., 2020. Evaluation of carbon sinks by the seagrass *Cymodocea nodosa* at an oceanic island: Spatial variation and economic valuation. *Ocean & Coastal Management*. 187, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105112>

4. Barnes, M.L., Wang, P., Cinner, J.E. *et al.*, 2020. Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change. *Nat. Clim. Chang.* 10, 823–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0871-4>
5. Barrón, C., Duarte, C.M., 2015. Dissolved organic carbon pools and export from the coastal ocean. *Global Biogeochemical Cycles.* 29 (10), 1725-1738. <https://doi.org/10.1002/2014GB005056>
6. Beaumont, N.J., Jones, L., Garbutt, A., Hansom, J.D., Toberman, M., 2014. The value of carbon sequestration and storage in coastal habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 137, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.022>.
7. Buck-Wiese, H., Andskog, M.A., Nguyen, N.P., ..., Hehemann, J., 2022. Furoid brown algae inject fucoidan carbon into the ocean. *PNAS.* 120(1), e2210561119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2210561119>
8. Christie-Oleza, J., Sousoni, D., Lloyd, M. *et al.*, 2017. Nutrient recycling facilitates long-term stability of marine microbial phototroph–heterotroph interactions. *Nat Microbiol.* 2, 17100. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.100>
9. Clarke, K. & Gorley, R., 2015. PRIMER version 7: User manual/tutorial. PRIMER-E. 192.
10. Coumou, D., Rahmstorf, S., 2012. A decade of weather extremes. *Nature Clim Change.* 2, 491–496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
11. Cruzado, A., Velásquez, Z., Pérez, M.C., Bahamón, N., Grimaldo, N.S., Ridolfi, F., 2002. Nutrient fluxes from the Ebro River and subsequent across-shelf dispersion. *Continental Shelf Research.* 22(2), 349-360. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00060-7)
12. de Vasconcelos, E.R.T.P.P., Vasconcelos, J.B., Reis, T.N.d. *et al.*, 2019. Macroalgal responses to coastal urbanization: relative abundance of indicator species. *J Appl Phycol.* 31, 893–903. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1639-3>
13. Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I.E., Mazarrasa, I., Marba, N., 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Change.* 3, 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
14. Erb, K.H., Kastner, T., Plutzer, C. *et al.* 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature.* 553, 73–76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>
15. Frölicher, T.L., Laufkötter, C., 2018. Emerging risks from marine heat waves. *Nat Commun.* 9, 650. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03163-6>
16. Gorman, D., Pavone, C.B., and Flores, A.A.V., 2020. Changes to the Structure of Tropical Seagrass Meadows (*Halophila Decipiens*) in the Warm-Temperate Waters of the Southwest Atlantic. *Aquat. Bot.* 161, 103174. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2019.103174>
17. Gouvêa, L.P., Horta, P.A., Fragkopoulou, E., Gurgel, C.F., Peres, L.M., Bastos, E., ... & Assis, J., 2023. Phenotypic plasticity in sargassum forests may not counteract projected biomass losses along a broad latitudinal gradient. *Ecosystems.* 26(1), 29-41. <https://doi.org/10.1007/s10021-022-00738-9>
18. Gouvêa, L.P., Assis, J., Gurgel, C.F.D., Serrão, E.A., Silveira, T.C.L., Santos, R., Duarte, C.M., Peres, L.M.C., Carvalho, V.F., Batista, M., Bastos, E., Sissini, M.S., Horta, P.A., 2020. Golden carbon of *Sargassum* forests revealed as an opportunity for climate change mitigation. *Science of The Total Environment.* 729, 138745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138745>.

19. Hill, R., Bellgrove, A., Macreadie, P.I., Petrou, K., Beardall, J., Steven, A., Ralph, P.J., 2015. Can macroalgae contribute to blue carbon? An Australian perspective. *Limnol. Oceanogr.* 60, 1689–1706. <https://doi.org/10.1002/lno.10128>
20. Horta, P., Koerich, G., Grimaldi, G., Mueller, C. M., Destri, G., de Macêdo Carneiro, P. B., 2022. Patagonian marine forests in a scenario of global and local stressors. In *Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems: A Journey Through Time* (pp. 151-176). Cham: Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-86676-1_7
21. Horta, P., Salles, J., Bouzon, J., Bouzon, Z., Scherner, F., Cabral, D., & Bouzon, Z., 2009. SUBTIDAL PHYTOBENTHUS COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE ARVOREDO MARINE BIOLOGICAL RESERVE, SANTA CATARINA, BRAZIL -- IMPLICATIONS TO THE CONSERVATION.. *Oecologia Australis.* 12(2), 243-257. <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2008.1202.06>
22. Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E.M., Pidgeon, E., Simpson, S., 2017. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Font. In Ecology and the Environment.* 15 (1), 42-50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
23. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., <http://dx.doi.org/10.1017/9781009325844>.
24. Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C.M., Fourqurean, J.W., Holmer, M., Marbà, N., Middleburg, J.J., 2010. Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constrains. *Global Biogeochemical Cycles.* 24(4), GB4026. <https://doi.org/10.1029/2010GB003848>
25. Krause-Jensen, D., Duarte, C. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. 2016. *Nature Geosci.* 9, 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
26. Krause-Jensen, D., Lavery, P., Serrano, O., Marba, N., Masque, P., Duarte, C.M., 2018. Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biol. Lett.* 14 (6), 20180236 . <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>
27. Laffoley D., Grimsditch G.D. (eds), 2009. The management of natural coastal carbon sinks. International Union for Conservation of Nature (IUCN). <https://www.iucn.org/resources/publication/management-natural-coastal-carbon-sinks> (accessed 11 August 2021).
28. Lanari, M., Horta, P.A., Copertino, M.S., 2022. Functional redundancy and stability in a subtidal macroalgal community in the Southwestern Atlantic coast. *Marine Environmental Research.* 173, 105519. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105519>
29. Lautenbach, S., Jungandreas, A., Blanke, J., Lehsten, V., Mühlner, S., Kühn, I., Volk, M., 2017. Trade-offs between plant species richness and carbon storage in the context of afforestation—examples from afforestation scenarios in the Mulde Basin, Germany. *Ecological Indicators.* 73, 139-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.035>

30. Liu, D., Keesing, J.K., Xing, Q., Shi, P., 2009. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. *Marine pollution bulletin*. 58(6), 888-895. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.01.013>
31. Lovelock C.E., Duarte C.M., 2019. Dimensions of Blue Carbon and emerging perspectives. *Biol. Lett.* 15, 20180781. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>
32. Nellemann C., Corcoran E., Duarte C.M., Valdes L., DeYoung C., Fonseca L., Grimsditch G. (eds), 2009. *Blue Carbon: The role of healthy oceans in binding carbon. A rapid response assessment*. Arendal, Norway: United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. ISBN: 978-82-7701-060-1
33. Ortega, A., Geraldini, N.R., Alam, I. *et al.*, 2019. Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration. *Nat. Geosci.* 12, 748–754. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0421-8>
34. Osuri, A.M., Gopal, A., Raman, T.S., DeFries, R., Cook-Patton, S.C., Naeem, S., 2020. Greater stability of carbon capture in species-rich natural forests compared to species-poor plantations. *Environmental Research Letters*. 15(3), 034011. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab5f75>
35. Portugal, A.B., Carvalho, F.L., de Macedo Carneiro, P.B., Rossi, S., de Oliveira Soares, M., 2016. Increased anthropogenic pressure decreases species richness in tropical intertidal reefs. *Marine environmental research*. 120, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.005>
36. Rahman, M.M., Zimmer, M., Ahmed, I., Donato, D., Kanzaki, M., Xu, M., 2021. Co-benefits of protecting mangroves for biodiversity conservation and carbon storage. *Nature communications*. 12(1), 3875. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24207-4>
37. RStudio Team, 2020. *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
38. Scherner, F., Bonomi Barufi, J., Horta, P.A., 2012. Photosynthetic response of two seaweed species along an urban pollution gradient: evidence of selection of pollution-tolerant species. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 2380–2390. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.012>.
39. Seddon, N., Daniels, E., Davis, R., Chausson, A., Harris, R., Hou-Jones, X., ... , Wicander, S., 2020. Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change. *Global Sustainability*. 3, E15. <https://doi.org/10.1017/sus.2020.8>
40. Smetacek, V., & Zingone, A., 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*. 504(7478), 84-88. <https://doi.org/10.1038/nature12860>
[dataset] Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F., De Clerck, O., 2012. Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 21, 272–281. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x>
41. Smith, S.V., 1981. Marine Macrophytes as a Global Carbon Sink. *Science*. 211 (4484), 838-840. <https://doi.org/10.1126/science.211.4484.838>
42. Spalding, M.D. *et al.*, 2007. *Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas*. *BioScience*. 57(7), 573–583. <https://doi.org/10.1641/B570707>
43. United Nations Environment Programme, 2009. *UNEP 2008 annual report*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7742>. (accessed 20 May 2023).

44. United Nations Environment Programme, 2010. UNEP 2009 annual report. <https://www.unep.org/resources/annual-report/unep-2009-annual-report> (accessed 20 May 2023).
45. van der Heijden, L. H. and Kamenos, N. A., 2015. Reviews and syntheses: Calculating the global contribution of coralline algae to total carbon burial. *Biogeosciences*. 12, 6429–6441. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6429-2015>
46. van der Loos, L.M., Eriksson, B.K., Salles, J.F., 2019. The Macroalgal Holobiont in a Changing Sea. *Trends in Microbiology*. 27(7), 635-650. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.03.002>.
47. Wang, M., Hu, C., Barnes, B.B., Mitchum, G., Lapointe, B., Montoya, J.P., 2019. The great Atlantic sargassum belt. *Science*. 365(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
48. Ware, J.R., Smith, S.V., Reaka-Kudla, M.L., 1992. Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO₂?. *Coral Reefs*. 11, 127–130. <https://doi.org/10.1007/BF00255465>
49. Xu, S., Eisenhauer, N., Ferlian, O., Zhang, J., Zhou, G., Lu, X., ..., Zhang, D., 2020. Species richness promotes ecosystem carbon storage: evidence from biodiversity-ecosystem functioning experiments. *Proceedings of the Royal Society B*. 287(1939), 20202063. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2063>
50. Zuur, A.F., Ieno, E.N. and Elphick, C.S., 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*. 1, 3-14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>

2. DISCUSSÃO GERAL E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do que foi trabalhado no projeto, foi possível observar que a biomassa de macroalgas ao longo da costa brasileira possui capacidade de contribuir com o sequestro de carbono atmosférico, com espécies apresentando mais de 30% da sua biomassa seca em teor de Carbono (Capítulo 1). O gradiente de distância do continente, variável que contribui para diferentes conjuntos de condições ambientais, influenciou na comunidade algal e, conseqüentemente, na capacidade destes organismos de capturar e armazenar carbono.

As condições ambientais se mostraram significativas para a diferença no teor de carbono das espécies avaliadas entre os pontos amostrados. As comunidades das ilhas mais distantes da costa, apresentaram um coeficiente C:N mais elevado em relação aos pontos mais próximos (Capítulo 1). Além da crescente concentração de carbono, foi observado também incremento na riqueza de espécies das comunidades mais afastadas da costa, mesmo sendo os pontos com menor abundância. Isto sugere que pode haver relação entre a disponibilidade de nutrientes como o nitrato, a concentração de compostos refratários nas espécies dominantes das comunidades avaliadas e o nível de irradiância.

Os gêneros mais avistados (*Sargassum* e *Gelidium*) possuem compostos que oferecem resistência à ação microbiana, fucoidans e carragenanas, respectivamente. Estes compostos refratários podem representar até metade da biomassa seca destes organismos (TARMAN et al., 2020), conferindo a estes grupos a capacidade de sequestro do carbono capturado.

Assim, como discutido no Capítulo 1, esses pontos provocam a reflexão da inclusão desses habitats como sistemas Carbono Azul. No entanto, a discussão acerca da inclusão das macroalgas em políticas públicas de proteção ambiental não pode ser reduzida a um *status*. Considerá-las Ecossistemas Carbono Azul vai além de reconhecer um serviço ecológico de captura de gás carbônico, pode oferecer subsídio para a manutenção de áreas de preservação, como a Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha, ilhas amostradas neste trabalho. Além do mais, possibilitar a criação de outras áreas de conservação a partir de estudos que avaliem o potencial de sequestro de carbono de ilhas brasileiras pode surgir como uma estratégia aliada ao Objetivo para o Desenvolvimento Sustentável 14 (Vida na Água), no qual se encontra a Década dos Oceanos.

A crise ambiental e a crise climática andam de mãos dadas, e fomentar a proteção da biodiversidade, implica em garantir a estabilidade e resiliência dos ambientes, assim como o desempenho dos serviços ecossistêmicos tão visados para as Soluções Baseadas na Natureza (NbS).

Considerando a participação das algas na composição da estrutura recifal brasileira, fechar os olhos para o papel na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas que este grupo desempenha é desperdiçar a chance de alcançar metas exaustivamente discutidas por planos de governo e acordos internacionais.

Para os próximos esforços, dedicar-se a investigar os estoques de carbono de mais ambientes marinhos da Amazônia Azul pode trazer maior subsídio para a inclusão destes pontos na estrutura de políticas ambientais, porém sempre prestando atenção na diversidade de espécies e na estrutura das comunidades.

REFERÊNCIAS

- Aued A.W., Smith F., Quimbayo J.P., Cândido D.V., Longo G.O., Ferreira C.E.L., *et al.*, 2018. Large-scale patterns of benthic marine communities in the Brazilian Province. *PLoS ONE*. 13(6), e0198452. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198452>
- Barnes, M.L., Wang, P., Cinner, J.E. *et al.*, 2020. Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change. *Nat. Clim. Chang.* 10, 823–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0871-4>
- Barrón, C., Duarte, C.M., 2015. Dissolved organic carbon pools and export from the coastal ocean. *Global Biogeochemical Cycles*. 29 (10), 1725-1738. <https://doi.org/10.1002/2014GB005056>
- Beaumont, N.J., Jones, L., Garbutt, A., Hansom, J.D., Toberman, M., 2014. The value of carbon sequestration and storage in coastal habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 137, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.022>.
- Bernal-Ibáñez, A., Gestoso, I., Wirtz, P. *et al.*, 2021. The collapse of marine forests: drastic reduction in populations of the family Sargassaceae in Madeira Island (NE Atlantic). *Reg Environ Change*. 21, 71. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01801-2>
- Cavalcanti, G.S., Shukla, P., Morris, M. *et al.* 2018. Rhodoliths holobionts in a changing ocean: host-microbes interactions mediate coralline algae resilience under ocean acidification. *BMC Genomics*. 19, 701. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5064-4>

- Chen, S., Xu, K., Ji, D., Wang, W., Xu, Y., Chen, C., Xie, C., 2020. Release of dissolved and particulate organic matter by marine macroalgae and its biogeochemical implications. *Algal Research*. 52, 102096. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102096>
- Coumou, D., Rahmstorf, S., 2012. A decade of weather extremes. *Nature Clim Change*. 2, 491–496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- de Vasconcelos, E.R.T.P.P., Vasconcelos, J.B., Reis, T.N.d. *et al.*, 2019. Macroalgal responses to coastal urbanization: relative abundance of indicator species. *J Appl Phycol*. 31, 893–903. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1639-3>
- Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I.E., Mazarrasa, I., Marba, N., 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Change*. 3, 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Ferreira, C.E.L., Hachich, N.F., Pinheiro, H.T., Quimbayo, J.P., Luiz, O.J., Mendes, T.C., 2020. Ilhas Oceânicas: Biogeografia, Evolução e Conservação, in: Pereira, R.C., Soares-Gomes, A., (eds.) 2020. *Ecologia Marinha*. Editora Interciência, pp. 341-372.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneeth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metz, N., Monacci, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrot, D., Pockock, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., Wright, R., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., and Zheng, B., 2022. Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data*. 14, 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Frölicher, T.L., Laufkötter, C., 2018. Emerging risks from marine heat waves. *Nat Commun*. 9, 650. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03163-6>
- Gouvêa, L.P., Assis, J., Gurgel, C.F.D., Serrão, E.A., Silveira, T.C.L., Santos, R., Duarte, C.M., Peres, L.M.C., Carvalho, V.F., Batista, M., Bastos, E., Sissini, M.S., Horta, P.A., 2020. Golden carbon of *Sargassum* forests revealed as an opportunity for climate change mitigation. *Science of The Total Environment*. 729, 138745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138745>.
- Hill, R., Bellgrove, A., Macreadie, P.I., Petrou, K., Beardall, J., Steven, A., Ralph, P.J., 2015. Can macroalgae contribute to blue carbon? An Australian perspective. *Limnol. Oceanogr*. 60, 1689–1706. <https://doi.org/10.1002/lno.10128>
- Horta, P., Pinho, P.F., Gouvea, L., Grimaldi, G., Destri, G., Mueller, C.M., Rocha, L., Barufi, J. B., Rorig, L., Assis, J., Cotrim da Cunha, L., 2020. Climate change and Brazil's coastal zone: socio-environmental vulnerabilities and action strategies. *Sustainability in Debate*. 11(3), 405–444. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33845>

- Horta, P., Salles, J., Bouzon, J., Bouzon, Z., Scherner, F., Cabral, D., & Bouzon, Z., 2009. SUBTIDAL PHYTOBENTHOS COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE ARVOREDO MARINE BIOLOGICAL RESERVE, SANTA CATARINA, BRAZIL -- IMPLICATIONS TO THE CONSERVATION.. *Oecologia Australis*. 12(2), 243-257. <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2008.1202.06>
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E.M., Pidgeon, E., Simpson, S., 2017. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Font. In Ecology and the Environment*. 15 (1), 42-50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., <http://dx.doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C.M., Fourqurean, J.W., Holmer, M., Marbà, N., Middleburg, J.J., 2010. Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constrains. *Global Biogeochemical Cycles*. 24(4), GB4026. <https://doi.org/10.1029/2010GB003848>
- Krause-Jensen, D., Duarte, C. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. 2016. *Nature Geosci*. 9, 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Krause-Jensen, D., Lavery, P., Serrano, O., Marba, N., Masque, P., Duarte, C.M., 2018. Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biol. Lett.* 14 (6), 20180236 . <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>
- Laffoley D., Grimsditch G.D. (eds), 2009. The management of natural coastal carbon sinks. International Union for Conservation of Nature (IUCN). <https://www.iucn.org/resources/publication/management-natural-coastal-carbon-sinks> (acesso em 11 Agosto de 2021).
- Le Quéré, C., Raupach, M., Canadell, J. *et al.*, 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geosci*. 2, 831–836. <https://doi.org/10.1038/ngeo689>
- Lovelock C.E., Duarte C.M., 2019. Dimensions of Blue Carbon and emerging perspectives. *Biol. Lett.* 15, 20180781. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>
- Millero, F. J., 2007. The marine inorganic carbon cycle. *Chem. Rev.* 107 (2), 308–341. <https://doi.org/10.1021/cr0503557>
- Nellemann C., Corcoran E., Duarte C.M., Valdes L., DeYoung C., Fonseca L., Grimsditch G. (eds), 2009. Blue Carbon: The role of healthy oceans in binding carbon. A rapid response assessment. Arendal, Norway: United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. ISBN: 978-82-7701-060-1
- Ortega, A., Geraldi, N.R., Alam, I. *et al.*, 2019. Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration. *Nat. Geosci*. 12, 748–754. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0421-8>
- Portugal, A.B., Carvalho, F.L., de Macedo Carneiro, P.B., Rossi, S., de Oliveira Soares, M., 2016. Increased anthropogenic pressure decreases species richness in tropical intertidal reefs. *Marine environmental research*. 120, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.005>
- Scherner, F., Bonomi Barufi, J., Horta, P.A., 2012. Photosynthetic response of two seaweed species along an urban pollution gradient: evidence of selection of

- pollution-tolerant species. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 2380–2390. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.012>
- Schubert, N., Salazar, V.W., Rich, W.A., Vivanco Bercovich, M., Almeida Saá, A.C., Fadigas, S.D., Silva, J., Horta, P.A., 2019. Rhodolith primary and carbonate production in a changing ocean: The interplay of warming and nutrients. *The Science of the total environment.* 676, 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.280>
- Seddon, N., Daniels, E., Davis, R., Chausson, A., Harris, R., Hou-Jones, X., ... , Wicander, S., 2020. Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change. *Global Sustainability.* 3, E15. <https://doi.org/10.1017/sus.2020.8>
- Tarman, K., Sadi, U., Santoso, J., & Hardjito, L. (2020). Carrageenan and its enzymatic extraction. *Encyclopedia of Marine Biotechnology*, 1, 147-159. <https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch7>
- United Nations Environment Programme, 2009. *UNEP 2008 annual report.* <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7742>. (acesso em 20 Maio de 2023).
- United Nations Environment Programme, 2010. *UNEP 2009 annual report.* <https://www.unep.org/resources/annual-report/unep-2009-annual-report> (acesso em 20 Maio de 2023).
- van der Loos, L.M., Eriksson, B.K., Salles, J.F., 2019. The Macroalgal Holobiont in a Changing Sea. *Trends in Microbiology.* 27(7), 635-650. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.03.002>.
- Wernberg, T., Smale, D., Tuya, F. *et al.*, 2013. An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Clim Change.* 3, 78–82. <https://doi.org/10.1038/nclimate1627>